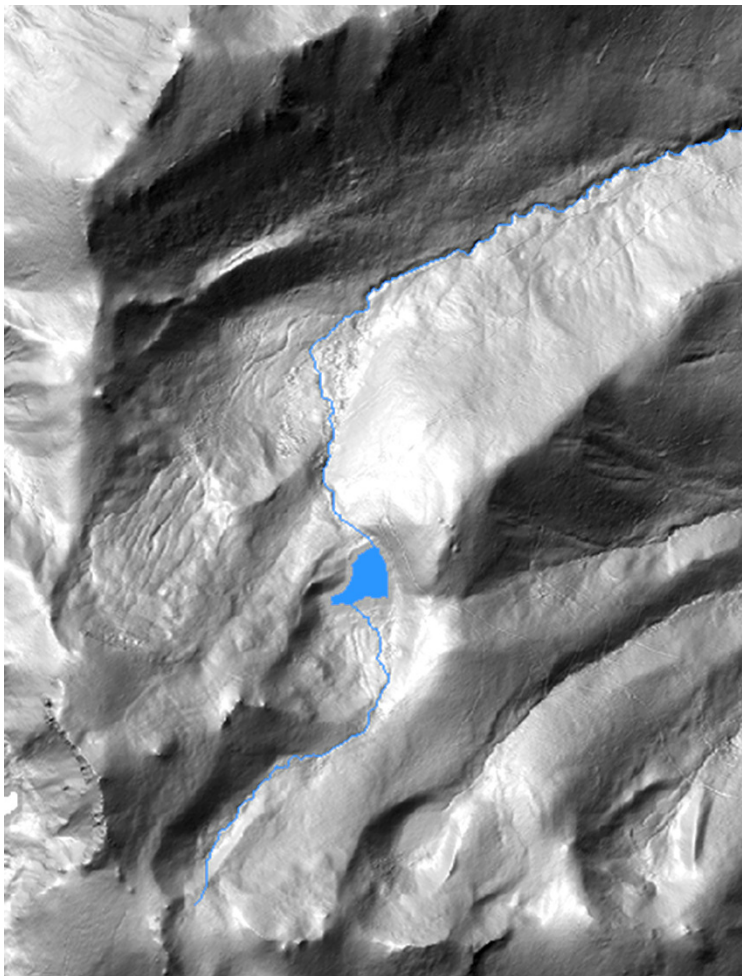




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Χαρτογραφίας

**ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
LiDAR – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΝΤΩΝΙΑΔΗ ΣΥΛΒΙΑ**



Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας - Εργαστήριο Χαρτογραφίας

Διπλωματική Εργασία

Αντωνιάδη Σύλβια

**ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ LiDAR –
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ**

Τριμελής Επιτροπή:

Νάκος Βύρωνας, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Ναλμπάντης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Συνεπιβλέπων)

Τσούλος Λύσανδρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

Προλογικό Σημείωμα

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βύρωνα Νάκο για την συνεχή καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τον συνεπιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Ναλμπάντη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στην κ. Ινώ Παπαγεωργάκη, καθώς και στον κ. Βασίλειο Κρασανάκη, για την ουσιαστική βοήθειά τους στα λογισμικά εφαρμογής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αντωνιάδη Σύλβια

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	5
1.1. Γεωμορφομετρία	5
1.2. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	7
1.2.1. Δομές αναπαράστασης των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου	8
1.2.2. Η ποιότητα των δεδομένων	9
1.2.3. Η ακρίβεια και η απόκτηση των δεδομένων	10
1.2.4. Η επίδραση της κλίμακας στην ψηφιακή ανάλυση του εδάφους.....	11
1.3. Υδρολογικές Εφαρμογές Βάσει Ψηφιακών Δεδομένων	12
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	13
2.1. Διερεύνηση για τον Καθορισμό της Περιοχής Μελέτης.....	13
2.2. Τα Κριτήρια Προσδιορισμού της Περιοχής και η Συλλογή των Δεδομένων.....	13
2.3. Γενικά Στοιχεία	15
2.3.1. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης.....	15
2.3.2. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Madden	17
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	19
3.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Ύψομέτρων	19
3.1.2. Παρεμβολή.....	19
3.2. Προεπεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Ύψομέτρων.....	20
3.2.1. Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης (Gaussian Filter)	20
3.2.2. Συμπλήρωση των Βυθισμάτων (Fill Sinks)	21
3.3. Ερμηνεία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους	23
3.3.1. Γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά.....	24
3.3.2. Χαρακτηριστικά υδρολογικού ενδιαφέροντος.....	34
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ	45
4.1. Λογισμικά Εφαρμογής	45
4.1.1. Το λογισμικό SAGA	45
4.1.2. Το λογισμικό MATLAB	45
4.1.3. Το λογισμικό ArcGIS.....	46
4.2. Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Ύψομέτρων από Δεδομένα LiDAR	46
4.3. Σύγκριση Μοντέλων ως προς τα Γεωμορφομετρικά Χαρακτηριστικά.....	50

4.4. Σύγκριση Μοντέλων ως προς τα Υδρογραφικά Χαρακτηριστικά	53
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	59
5.1. Στατιστικά Στοιχεία Ψηφιακών Μοντέλων.....	59
5.2. Μελέτη Επίδρασης της Χωρικής Ανάλυσης στα Γεωμορφομετρικά Χαρακτηριστικά	68
5.3. Μελέτη Επίδρασης της Χωρικής Ανάλυσης στα Υδρογραφικά Χαρακτηριστικά	97
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	117
6.1. Γενικά Συμπεράσματα.....	117
6.2. Προοπτικές-Προτάσεις.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	129

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 1.</i> Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων της γεωμορφομετρικής ανάλυσης	6
<i>Εικόνα 2.</i> Η σύνδεση της γεωμορφομετρίας με άλλες επιστήμες και εφαρμογές	7
<i>Εικόνα 3.</i> Μέθοδοι αναπαράστασης της υψομετρικής πληροφορίας: (α)Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (β)Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (γ)Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος	9
<i>Εικόνα 4.</i> Το φάσμα της χωρικής κλίμακας.....	12
<i>Εικόνα 5.</i> Χάρτης της Λίμνης Ταχός.....	15
<i>Εικόνα 6.</i> Οι υπολεκάνες απορροής της λίμνης Ταχός - Ορισμός περιοχής μελέτης.....	18
<i>Εικόνα 7.</i> Παράλληλο σύστημα εφαρμογής του αλγορίθμου Planchon & Darboux.....	23
<i>Εικόνα 8.</i> Το μοντέλο των Zevenbergen & Thorne (1987)	25
<i>Εικόνα 9.</i> Σχηματική αναπαράσταση των παραμέτρων της κλίσης και της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης	27
<i>Εικόνα 10.</i> Βασικές ορθογόνιες συνιστώσες της καμπυλότητας.....	27
<i>Εικόνα 11.</i> α) καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature) β) καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature)	29
<i>Εικόνα 12.</i> Ερμηνεία των τιμών της plan (PLANC) και profile (PROFC) καμπυλότητας α) θετική PLANC β) αρνητική PLANC γ) θετική PROFC δ) αρνητική PROFC	29
<i>Εικόνα 13.</i> Αλγόριθμοι μονής και πολλαπλής κατεύθυνσης ροής	31
<i>Εικόνα 14.</i> Μέθοδοι κατάταξης των ρευμάτων σε τάξεις ιεράρχησης	39
<i>Εικόνα 15.</i> Κατανομή της αβεβαιότητας των υψομέτρων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης του ΨΜΥ	47
<i>Εικόνα 16.</i> Λογικό διάγραμμα ροής υπολογισμού των στατιστικών διαφορών των υψομέτρων κατόπιν της πλήρωσης των βυθισμάτων, στο λογισμικό MATLAB.....	49
<i>Εικόνα 17.</i> Λογικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού των διαφορών των μοντέλων, στο λογισμικό MATLAB	52
<i>Εικόνα 18a.</i> Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 1 m.....	55
<i>Εικόνα 18b.</i> Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 5 m.....	55
<i>Εικόνα 18c.</i> Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 10 m.....	56
<i>Εικόνα 18d.</i> Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 25 m.....	56
<i>Εικόνα 18e.</i> Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 50 m.....	57
<i>Εικόνα 19.</i> Μέση τιμή της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	60
<i>Εικόνα 20.</i> Διαγράμματα διασποράς (scatter plots) των τιμών της γωνίας κλίσης για τα συγκρινόμενα μοντέλα.....	61
<i>Εικόνα 21.</i> Μέση τιμή της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	62

Εικόνα 22. Μέση τιμή των συνιστωσών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	63
Εικόνα 23. Μέση τιμή της συσσώρευσης ροής των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	64
Εικόνα 24. Μέση τιμή του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	65
Εικόνα 25. Ετήσια συνολική απόδοση ιζήματος(<i>Total Suspended Solids</i>) για τις υπολεκάνες της Λίμνης Ταχός	66
Εικόνα 26. Μέση τιμή του συντελεστή αναγλύφου <i>LS</i> των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	67
Εικόνα 27. Μέση τιμή του δείκτη ροής ενέργειας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	68
Εικόνα 28. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της γωνίας κλίσης συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	69
Εικόνα 29. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	70
Εικόνα 30. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	71
Εικόνα 31. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	72
Εικόνα 32. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	73
Εικόνα 33. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	74
Εικόνα 34. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	75
Εικόνα 35. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	76
Εικόνα 36. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	77
Εικόνα 37. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	78
Εικόνα 38. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	79
Εικόνα 39. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	80

Εικόνα 40. Ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων των διαφορών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, των συγκρινόμενων μοντέλων	80
Εικόνα 41. Ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων των διαφορών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, των συγκρινόμενων μοντέλων	81
Εικόνα 42. Ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας των μοντέλων ανάλυσης 25 m και 50 m, από το μοντέλο αναφοράς.....	82
Εικόνα 43. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	83
Εικόνα 44. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	84
Εικόνα 45. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	85
Εικόνα 46. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	86
Εικόνα 47. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	87
Εικόνα 48. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του δείκτη αναγλύφου, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	88
Εικόνα 49. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	89
Εικόνα 50. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	90
Εικόνα 51. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	91
Εικόνα 52. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	92
Εικόνα 53. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	93
Εικόνα 54. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	94
Εικόνα 55. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	95
Εικόνα 56. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	96
Εικόνα 57. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	97
Εικόνα 58. Απεικόνιση της μεταβολής της έκτασης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.....	98

<i>Εικόνα 59. Μεταβολή του μέσου υψομέτρου της υπό μελέτη λεκάνης απορροής</i>	99
Εικόνα 60a. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1 m.....	100
Εικόνα 60b. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 5 m.....	100
Εικόνα 60c. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 10 m.....	100
Εικόνα 60d. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m.....	101
Εικόνα 60e. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m.....	101
Εικόνα 61. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης κλίσης της λεκάνης απορροής	102
Εικόνα 62. Κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης για την παράμετρο της μέσης κλίσης της υπό μελέτη λεκάνης, στα συγκρινόμενα ΨΜΥ	103
Εικόνα 63. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 1m.	104
Εικόνα 64. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 5m.	105
Εικόνα 65. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 10m	106
Εικόνα 66. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 25m	107
Εικόνα 67. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 50m	108
Εικόνα 68. Απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής του μήκους του κύριου υδατορεύματος	112
Εικόνα 69. Απεικόνιση της πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου, συναρτήσει της ανάλυσης του μοντέλου	112
Εικόνα 70. Απεικόνιση του μέσου μήκους επιφανειακής απορροής συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	112
Εικόνα 71a. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1 m	113
Εικόνα 71b. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 5 m	113
Εικόνα 71c. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 10 m	114
Εικόνα 71d. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m	114
Εικόνα 71e. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m	115
Εικόνα 72. Χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, από ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων	116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 1. Μέσο υψόμετρο περιοχής μελέτης για κάθε ΨΜΥ και διαφορά μέσων υψομέτρων από το μέσο υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς</i>	46
<i>Πίνακας 2. Παράμετροι εφαρμογής φίλτρου Gauss στα ΨΜΥ.....</i>	47
<i>Πίνακας 3. Αποτελέσματα και στατιστικά των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου συμπλήρωσης των βυθισμάτων.....</i>	50
<i>Πίνακας 4. Αποτελέσματα και στατιστικά στοιχεία εφαρμογής του αλγορίθμου συμπλήρωσης βυθισμάτων για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής</i>	54
<i>Πίνακας 5. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων κλίσης.....</i>	59
<i>Πίνακας 6. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης.....</i>	61
<i>Πίνακας 7. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων καμπυλότητας</i>	63
<i>Πίνακας 8. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων συσσώρευσης ροής</i>	64
<i>Πίνακας 9. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων τοπογραφικού δείκτη υγρασίας</i>	65
<i>Πίνακας 10. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων του συντελεστή αναγλύφου LS</i>	67
<i>Πίνακας 11. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων δείκτη ροής ενέργειας</i>	67
<i>Πίνακας 12. Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών της κλίσης, του μοντέλου αναφοράς με κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....</i>	69
<i>Πίνακας 13. Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των διευθύνσεων μέγιστης κλίσης (προσανατολισμός), του μοντέλου αναφοράς με κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους, διαφορετικής χωρικής ανάλυσης.....</i>	74
<i>Πίνακας 14. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης.....</i>	79
<i>Πίνακας 15. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης.....</i>	79
<i>Πίνακας 16. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του τοπογραφικού δείκτη, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης</i>	82
<i>Πίνακας 17. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του συντελεστή αναγλύφου για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης</i>	88
<i>Πίνακας 18. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του δείκτη ροής ενέργειας για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης</i>	93
<i>Πίνακας 19. Σύγκριση της έκτασης της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden</i>	98
<i>Πίνακας 20. Σύγκριση βασικών υψομέτρων της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden.....</i>	99
<i>Πίνακας 21. Σύγκριση της μέσης κλίσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden.....</i>	102
<i>Πίνακας 22. Λόγοι Horton για το υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης απορροής</i>	109

Πίνακας 23. Σύγκριση των λόγων Horton για το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Madden	110
Πίνακας 24. Σύγκριση του μήκους του κύριου υδατορεύματος Madden, της λεκάνης απορροής..	110
Πίνακας 25. Σύγκριση χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου, της λεκάνης απορροής	111
Πίνακας 26. Σύγκριση του χρόνου συρροής της λεκάνης απορροής	116
Πίνακας 27. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής (Ερμηνεία: ΑΠ: Αποτελεσματική χρήση, ΠΕ: Περιοριστική χρήση, ΑΝ: Αναποτελεσματική χρήση)	121

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Ερμηνεία
R_B	Λόγος διακλάδωσης κατά Horton (bifurcation ratio)
R_L	Λόγος μήκους κατά Horton (length ratio)
Z_m	Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής
t_c	Χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής
A	Έκταση λεκάνης απορροής
L_0	Μέση απόσταση επιφανειακής απορροής
D_d	Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου λεκάνης απορροής
S_g	Μέση κλίση λεκάνης απορροής
LS	Συντελεστής αναγλύφου
SPI	Δείκτης ροής ενέργειας
TWI	Τοπογραφικός δείκτης υγρασίας

Λέξεις κλειδιά: Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (ΨΜΥ), λεκάνη απορροής, χωρική ανάλυση, γεωμορφομετρία, υδρογραφικά χαρακτηριστικά, γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοπογραφία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διανομή και ροή του νερού μέσα στο φυσικό τοπίο. Η αυτοματοποιημένη εξαγωγή τοπογραφικών παραμέτρων από ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων (ΨΜΥ) αναγνωρίζεται πλέον ως μια επιτυχημένη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές, ιδίως λόγω της αυξημένης ποιότητας και κάλυψης που παρέχουν τα ΨΜΥ. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αξιολογήσει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των ΨΜΥ, προερχόμενων από δεδομένα LiDAR, σε εφαρμογές υδατικών πόρων. Ειδικότερα, μια σειρά από ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων συγκρίνονται με ένα ΨΜΥ υψηλής ανάλυσης, που χρησιμοποιείται ως αναφορά, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της κλίμακας στην εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών και υδρολογικών παραμέτρων λεκάνης απορροής. Τέλος, το ζήτημα της ποιότητας και της χωρικής ανάλυσης των ΨΜΥ, οι νέες μεθοδολογίες επεξεργασίας raster δεδομένων καθώς και η επέκταση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών σε εφαρμογές υδατικών πόρων αναμένεται να οδηγήσουν σε σημαντική εξάρτηση από τα ΨΜΥ, ως πηγή της τοπογραφικής και υδρολογικής πληροφορίας.

ABSTRACT

Earth's topography plays an important role in the distribution and flow of water into the natural landscape. The automated extraction of topographic parameters from Digital Elevation Models (DEMs) is recognized as a successful alternative to traditional surveys, particularly due to the increased quality and coverage of DEM data. The aim of the present diploma thesis is to evaluate the possibilities and limitations of DEMs, derived from LiDAR data, for use on water resources applications. Specifically, a range of DEMs represented at different resolutions is compared to a high resolution DEM, used as a benchmark, in order to study the scale effects to the extraction of topographic attributes and hydrological parameters of a drainage basin. Finally, the issue of quality and resolution of DEM, as well as new raster processing methodologies and the expanding Geographic Information Systems (GIS) capabilities to water resources applications are expected to lead to a significant reliance on DEMs as a source of topographic and drainage information.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

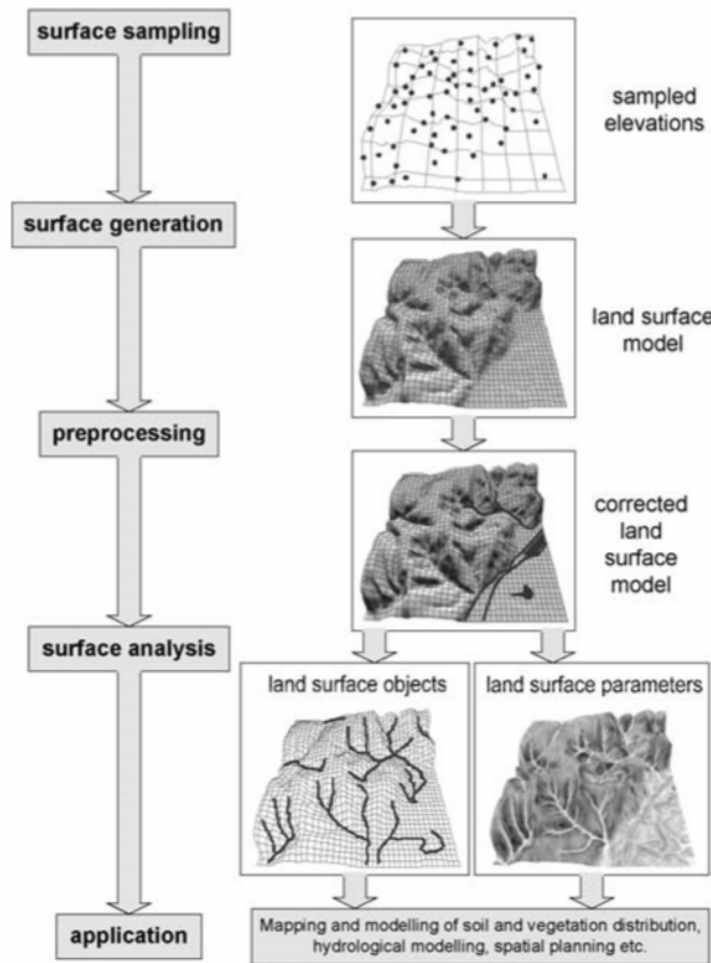
Οι τεχνολογικές εξελίξεις που συνδέονται με την χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, καθώς και η αύξηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, έχουν επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες χρησιμοποίησής τους σε υδρολογικές και υδραυλικές εφαρμογές, καθώς και σε ζητήματα προστασίας και διαχείρισης των υδατικών πόρων. Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η δυνατότητα χρήσης ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων, για την παραγωγή τοπογραφικών δεδομένων και τον υπολογισμό παραμέτρων υδρολογικού ενδιαφέροντος. Η διερεύνηση της επίπτωσης που επιφέρει η χωρική ανάλυση του ΨΜΥ στον υπολογισμό γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών χαρακτηριστικών, πραγματοποιείται για μία περιοχή μελέτης, που χωροθετείται πλησίον της λίμνης Ταχόης, στην αμερικανική πολιτεία της Καλιφόρνια. Η εν λόγω περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη μορφολογία και από την εδραίωση ενός σύνθετου υδρολογικού καθεστώτος. Στην υφιστάμενη μελέτη, συγκρίνονται μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων με το μοντέλο αναφοράς, της υψηλότερης ανάλυσης, ενώ η ανάκτηση της υψομετρικής πληροφορίας προέρχεται από συστήματα τηλεπισκόπησης (LiDAR). Η προέλευση της πληροφορίας επηρεάζει την ορθότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία του παραγόμενου αποτελέσματος. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκαν δεδομένα που αποδίδουν με υψηλή ακρίβεια την μορφολογία της γήινης επιφάνειας, εξομαλύνοντας τους φυσικούς, χρονικούς και οικονομικούς περιορισμούς, που τίθενται από την μέτρηση και τη διαχείριση δεδομένων πεδίου. Η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, των οποίων έπεται μία σύντομη περιγραφή. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο, με σκοπό να καταστεί απτή η διαδικασία που ορίζει η θεωρία της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, να διασαφηνιστούν τα στάδια μοντελοποίησης της επίδρασης της κλίμακας και επιπλέον να επισημανθεί η σπουδαιότητα των ζητημάτων αυτών σε εφαρμογές υδρολογικού ενδιαφέροντος. Στο δεύτερο κεφάλαιο, υπογραμμίζονται τα κριτήρια επιλογής της υπό μελέτη περιοχής, ενώ σκιαγραφείται το προφίλ της. Η μεθοδολογική προσέγγιση επισυνάπτεται στο τρίτο κεφάλαιο, όπου περιγράφονται τα στάδια προεπεξεργασίας των δεδομένων, ενώ παράλληλα παρατίθεται η φυσική βάση και η διαδικασία υπολογισμού των γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών παραμέτρων. Στο τέταρτο κεφάλαιο, υλοποιείται η μεθοδολογία, μέσω της διεκπεραίωσης των εφαρμογών στα επιλεγμένα λογισμικά και επιπλέον περιγράφεται η διαδικασία σύγκρισης των γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών χαρακτηριστικών, στα μοντέλα διαφορετικής χωρικής ανάλυσης. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα στατιστικά αποτελέσματα της σύγκρισης των υπολογισθισών παραμέτρων και ποσοτικοποιείται η επίδραση της κλίμακας, μέσα από την αναπαράσταση των διαφορών που προκύπτουν κατά την σύγκριση των μοντέλων με το μοντέλο αναφοράς. Η εργασία ολοκληρώνεται στο έκτο κεφάλαιο, όπου γίνεται η καταγραφή των συμπερασμάτων, σε σχέση με τον κύριο σκοπό της εργασίας και τους επιμέρους στόχους που τέθηκαν, ενώ επισημαίνονται ορισμένες προτάσεις που δίνουν το έναυσμα για μελλοντική έρευνα.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένας άξονας σημαντικών θεμάτων της βιβλιογραφικής ανάλυσης, τα οποία κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν, καθώς συνιστούν βασικό πυλώνα στην πραγμάτωση της υφιστάμενης μελέτης και παράλληλα αποτελούν ζητήματα που άπτονται των γεωεπιστημών και του αντικειμένου των μηχανικών.

1.1. Γεωμορφομετρία

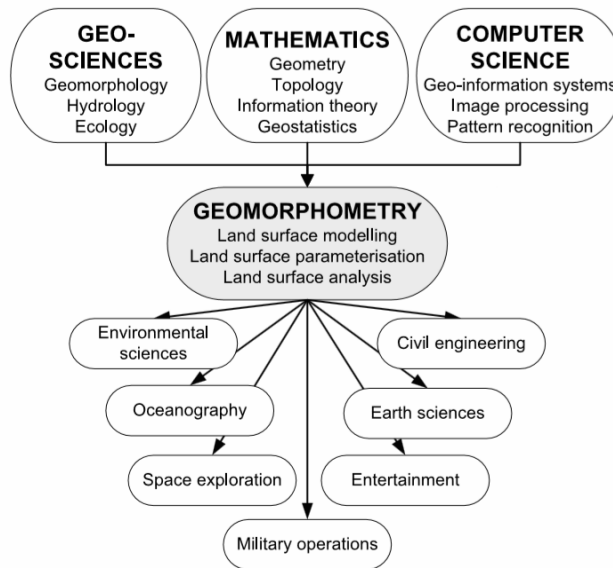
Η γεωμορφομετρία είναι ο επιστημονικός τομέας της ποσοτικής ανάλυσης της γήινης επιφάνειας, μέσω της εξαγωγής παραμέτρων και αντικειμένων από ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Αποτελεί μία σύγχρονη χαρτογραφική προσέγγιση της αναπαράστασης της μορφής του εδάφους, μέσω της διαχείρισης υψομετρικής πληροφορίας, σε περιβάλλον υπολογιστή (Pike et al., 2009). Οι παράμετροι αποτελούν τα περιγραφικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (π.χ. κλίση, καμπυλότητα, τοπογραφικός δείκτης υγρασίας) και οι τιμές τους αποδίδονται ως ένα συνεχές πεδίο τιμών, συνήθως υπό ψηφιδωτή μορφή (raster image or map). Αντιθέτως, τα αντικείμενα είναι διακριτά χωρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (π.χ. υδροκρίτης, αποστραγγιστικό δίκτυο), τα οποία εμφανίζονται σε διανυσματική μορφή (vector map) (σημεία, γραμμές, πολύγωνα), προερχόμενα από ψηφιακό μοντέλο. Σύμφωνα με τον Evans (1972), ο εν λόγω επιστημονικός τομέας διαχωρίζεται σε δύο κλάδους: την γενική γεωμορφομετρία (general geomorphometry), η οποία αναφέρεται στην μέτρηση και ανάλυση χαρακτηριστικών της συνεχούς γήινης επιφάνειας, και την ειδική γεωμορφομετρία (specific geomorphometry), η οποία σχετίζεται με την μέτρηση και ανάλυση διακριτών αντικειμένων, τα οποία οριοθετούνται ευκρινώς στην επιφάνεια της Γης. Στην **Εικόνα 1** παρουσιάζονται τα στάδια της γεωμορφομετρικής ανάλυσης. Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα ροής, η ανάλυση απαρτίζεται συγκεντρωτικά από πέντε επιμέρους διαδικασίες. Αρχικά, πραγματοποιείται η συλλογή της υψομετρικής πληροφορίας (δειγματοληψία), που αποσκοπεί στην δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στην συνέχεια, είναι αναγκαία η προεπεξεργασία του παραγόμενου μοντέλου, προκειμένου να εξαχθούν οι παράμετροι και τα αντικείμενα της υπό μελέτη επιφάνειας. Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι εφικτή η αξιολόγηση των τελικών προϊόντων (γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά) για την διεξαγωγή μιας ευρείας γκάμας εφαρμογών και περιβαλλοντικών μελετών, όπως είναι η πρόβλεψη ζωνών κορεσμού του εδάφους, η μελέτη του κινδύνου εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων, κ.α.



Εικόνα 1. Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων της γεωμορφομετρικής ανάλυσης

Πηγή: Pike et al., 2009

Επιπλέον, η γεωμορφομετρία καλύπτει ένα διεπιστημονικό πεδίο γνώσης, διότι είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα μαθηματικά, τις γεωεπιστήμες και την επιστήμη των υπολογιστών. Γενικότερα, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες και τα δεδομένα στον τομέα του περιβάλλοντος, καθώς και τη σπουδαιότητα μελέτης αυτών, η γεωμορφομετρία τίθεται στο επίκεντρο των περιβαλλοντικών μελετών και αποτελεί σημαντικό εργαλείο (**Εικόνα 2**). Τέλος, επισημαίνεται ότι, προς την κατεύθυνση της τεχνολογικής προόδου, αποτελεί έναν διαρκώς εξελισσόμενο τομέα που συμβάλλει θεμελιωδώς στην διεξαγωγή επιστημονικών ερευνών.



Εικόνα 2. Η σύνδεση της γεωμορφομετρίας με άλλες επιστήμες και εφαρμογές

Πηγή: Pike et al., 2009

1.2. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model), από την εισαγωγή του το 1958 (Miller & Laflamme, 1958) και έπειτα, έχει αποτελέσει τη βάση για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Η χρήση του, έχει επεκταθεί στον τομέα της τοπογραφίας και φωτογραμμετρίας, στον σχεδιασμό και στη διαχείριση των πόρων, ακόμα και σε στρατιωτικούς σκοπούς. Επιπλέον, σημαντική είναι και η αξιοποίησή του σε μελέτες περιβάλλοντος, καθώς και υδρολογικές εφαρμογές, όπως οι υδραυλικές μελέτες, ο έλεγχος πλημμυρών, ο σχεδιασμός, η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αξιοποίησης υδατικών πόρων, κ.τ.λ. Ειδικότερα, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο της γήινης επιφάνειας, και σύμφωνα με τους Li et al. (2005) ορίζεται ως εξής:

«Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποτελεί μια στατιστική απεικόνιση της συνεχούς επιφάνειας του εδάφους από έναν μεγάλο αριθμό επιλεγμένων σημείων με γνωστές τις συντεταγμένες τους X, Y, Z , σε ένα αυθαίρετο πεδίο αναφοράς» (Li et al., 2005, p.7).

Η συλλογή των στοιχείων για την δημιουργία του μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις εξής τεχνικές:

- Αποτύπωση πεδίου με χρήση τοπογραφικών οργάνων υψηλής ακρίβειας
- Φωτογραμμετρικές μέθοδοι χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικά όργανα, στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων
- Χαρτογραφική ψηφιοποίηση σε υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες
- Υπολογιστική προσομοίωση (π.χ. κλασματική γεωμετρία) (Νάκος, 1990)
- Με χρήση δεδομένων από συστήματα τηλεπισκόπησης (συστήματα LiDAR - δορυφορική αλτιμετρία)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μπορεί να συγκεντρώνει κάποιο από τα ακόλουθα σύνολα πληροφοριών:

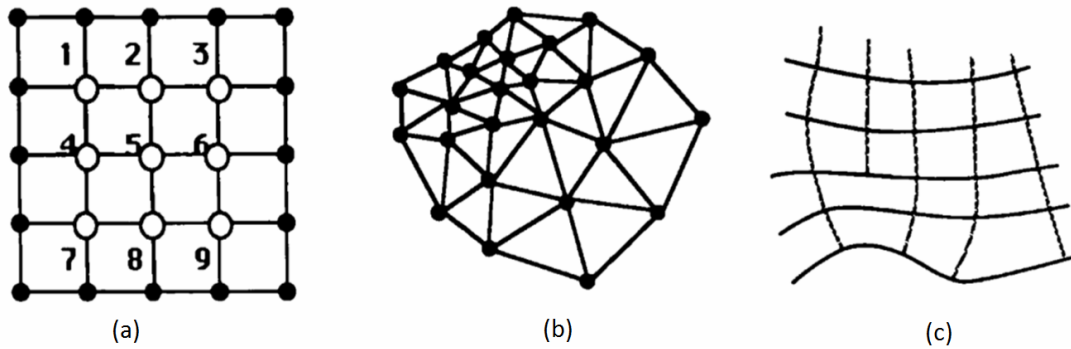
- Γεωμορφές, όπως η υψομετρική πληροφορία, η κλίση του εδάφους, καθώς και άλλα πιο σύνθετα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν το ανάγλυφο.
- Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά (π.χ. ποτάμια, λίμνες, ακτογραμμές), τα δίκτυα μεταφοράς (π.χ. δρόμοι, σιδηρόδρομοι, συγκοινωνιακοί κόμβοι), τις οικιστικές περιοχές, την οριοθέτηση περιοχών κ.α.
- Φυσικοί πόροι και περιβάλλον, όπως το έδαφος, τη βλάστηση, τη γεωλογία, το κλίμα, κ.α.
- Κοινωνικοοικονομικά δεδομένα, όπως είναι η κατανομή του πληθυσμού σε μια περιοχή, της βιομηχανίας, της γεωργίας, του εισοδήματος κ.α.

Επομένως, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποδίδει την κατανομή της χωρικής πληροφορίας από ένα καθορισμένο σύνολο σημειακών δεδομένων και έτσι βοηθά στην μοντελοποίηση, ανάλυση και κατόπιν, παρουσίαση φαινομένων που σχετίζονται με την τοπογραφία και άλλες επιστήμες.

1.2.1. Δομές αναπαράστασης των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου

Το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (ΨΜΥ) (Digital Elevation Model) είναι μια διατεταγμένη σειρά αριθμών, που αναπαριστά την χωρική κατανομή των υψομέτρων, τα οποία αναφέρονται σε ένα σύστημα αναφοράς. Γενικότερα, αποτελεί ένα υποσύνολο των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, στα οποία αναπαρίσταται, τα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (Moore et al., 1991). Το δίκτυο που αναπαριστά την υψομετρική πληροφορία του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί με μία από τις ακόλουθες μορφές (**Εικόνα 3**):

- ❖ Δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated irregular networks), το οποίο σχηματίζεται από χαρακτηριστικά σημεία της επιφάνειας του εδάφους (π.χ. κορυφογραμμές, σημεία αλλαγής της κλίσης), τα οποία αποθηκεύονται ως ένα σύνολο από συντεταγμένες X,Y,Z.
- ❖ Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (Square-grid network), κατά το οποίο τα δεδομένα αποθηκεύονται ως συντεταγμένες Z, σε διαδοχικά σημεία, κατά μήκος ενός προφίλ, με καθορισμένο το σημείο εκκίνησης και την απόσταση του πλέγματος.
- ❖ Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος (Contour-based network), το οποίο απαρτίζεται από ψηφιακές γραμμές περιγράμματος, καθορισμένου υψομέτρου, των οποίων τα δεδομένα αποθηκεύονται ως ζεύγη συντεταγμένων X,Y.



Εικόνα 3. Μέθοδοι αναπαράστασης της υψομετρικής πληροφορίας: (α) Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (β) Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (γ) Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος

Πηγή: Moore et al., 1991

Συνοπτικά, αναφέρεται ότι η μέθοδος των ακανόνιστων τριγώνων είναι περισσότερο πολύπλοκη και λιγότερο εύληπτη στον χρήστη, σε αντίθεση με την μέθοδο του πλέγματος που εμφανίζει μεγαλύτερη απλότητα και εύκολη κατανόηση. Αναφορικά με την δομή του δικτύου υπό μορφή περιγράμματος, επισημαίνεται ότι ως μέθοδος απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφορίας, ενώ μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα σε περιοχές, όπου επιδιώκεται η μελέτη του τρόπου ροής του ύδατος, στην επιφάνεια του εδάφους. Ακόμη, όσον αφορά το δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος, σκόπιμο είναι να αναφερθεί, ότι η επιλογή του μεγέθους του καννάβου επηρεάζει την υπολογιστική αποδοτικότητα και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται. Τέλος, σημειώνεται ότι η εν λόγω μέθοδος εμφανίζει αδυναμία στην διαχείριση απότομων αλλαγών των υψομέτρων και στην αναπαράσταση των διαδρομών ροής του ύδατος, σε υδρολογικές αναλύσεις. Ωστόσο, στην γεωμορφομετρική ανάλυση, συνηθέστερο δεδομένο εισόδου αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, υπό μορφή τετραγωνικού πλέγματος, καθορισμένης χωρικής ανάλυσης. Όπως προαναφέρθηκε, η μορφή του καννάβου για την απεικόνιση του ψηφιακού μοντέλου είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη και σύμφωνα με αυτήν η υψομετρική πληροφορία αποθηκεύεται σε ένα δίκτυο πλέγματος που αποτελείται από φαντρία. Η κανονικοποιημένη αυτή μορφή (raster data structure), ως δομή δεδομένων, εμφανίζεται καταλληλότερη στην διαχείριση της πληροφορίας με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και παρά το γεγονός ότι απαιτεί αυξημένη χωρητικότητα μνήμης, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, παρέχει αποδοτικότητα και αμεσότητα.

1.2.2. Η ποιότητα των δεδομένων

Το ζήτημα της ποιότητας αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στην διαχείριση χωρικών δεδομένων και εμπλέκεται σε όλα τα στάδια της γεωμορφομετρικής ανάλυσης. Η ποιότητα των δεδομένων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με έννοιες όπως η ακρίβεια, η ορθότητα και η έννοια του σφάλματος. Ο έλεγχος της ποιότητας στη δημιουργία ενός ΨΜΥ, αφορά όχι μόνο την καταλληλότητά του για την επίτευξη του επιδιωκόμενου σκοπού, αλλά και την πιστότητα αναπαράστασης της πραγματικής γήινης επιφάνειας. Για το λόγο αυτό, η συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και θέτοντας τα κατάλληλα κριτήρια, ενώ θα πρέπει να υφίσταται και έλεγχος των επιμέρους

διαδικασιών, βάσει συγκεκριμένων περιορισμών που τίθενται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

1.2.3. Η ακρίβεια και η απόκτηση των δεδομένων

Η ακρίβεια σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα (efficiency) και την οικονομία (economy) αποτελεί σημείο αναφοράς, κατά τον σχεδιασμό ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Li et al., 2005). Η ακρίβεια των ΨΜΥ, καθώς και των προϊόντων που προέρχονται από αυτά, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Πηγή απόκτησης της υψομετρικής πληροφορίας (περιλαμβάνει τεχνικές μέτρησης των υψομέτρων, πυκνότητα δείγματος κ.α.)
- Οριζοντιογραφική και κατακόρυφη ακρίβεια των δεδομένων
- Μέθοδοι παραγωγής ΨΜΥ από τα υψομετρικά δεδομένα (π.χ. ακρίβεια της μεθόδου παρεμβολής)
- Δομή αναπαράστασης των δεδομένων
- Χωρική ανάλυση ΨΜΥ
- Τοπογραφική πολυπλοκότητα του τοπίου που αναπαρίσταται
- Αλγόριθμοι υπολογισμού των χαρακτηριστικών του αναγλύφου

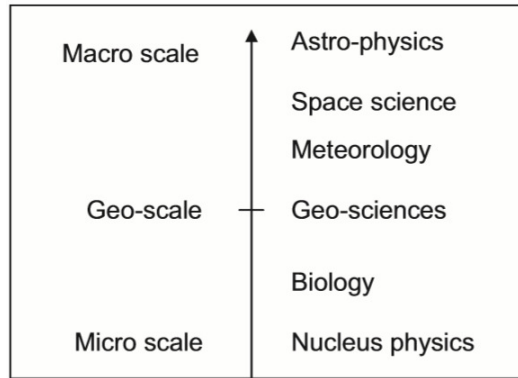
Αναφορικά με την απόκτηση των δεδομένων επισημαίνεται ότι η διαδικασία συνίσταται στην διάκριση δύο βημάτων, που είναι η δειγματοληψία και η μέτρηση. Η δειγματοληψία αναφέρεται στην διαδικασία επιλογής εκείνων των σημείων, που είναι αναγκαίο να μετρηθούν, καθώς οριοθετούν την εκάστοτε περιοχή μελέτης, ενώ η μέτρηση ολοκληρώνει την διαδικασία, εφόσον καθορίζει τις συντεταγμένες των σημείων της περιοχής. Τρεις σημαντικές παράμετροι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σχετικά με την απόκτηση των δεδομένων για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και αυτές είναι η πυκνότητα (density), η διανομή (distribution) και επιπλέον, η έννοια της ακρίβειας (accuracy), που αναφέρθηκε ανωτέρω. Οι δύο πρώτοι παράγοντες σχετίζονται με την δειγματοληψία και η επάρκεια αυτής συνδέεται άμεσα με την επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής, για την συγκέντρωση του δείγματος. Τέλος, αναφορικά με την δειγματοληψία σημειώνεται ότι για να ανιχνευθούν οι ασυνέχειες της επιφάνειας του εδάφους και να αναπαρασταθούν με κατάλληλο τρόπο οι μεταβολές της τοπογραφίας απαιτείται μία αφθονία δεδομένων.

1.2.4. Η επίδραση της κλίμακας στην ψηφιακή ανάλυση του εδάφους

Η μοντελοποίηση της επίδρασης της κλίμακας (χωρική ανάλυση) έχει ιδιαίτερη σημασία στον τομέα της ψηφιακής ανάλυσης αναγλύφου (Gallant, 2000). Η στρατηγική που ακολουθείται είναι η εξής:

- Αναπαράσταση των αρχικών υψομετρικών δεδομένων σε μία σειρά από ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων
- Εξαγωγή παραμέτρων και αντικειμένων από τα μοντέλα
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό μιας σχέσης ανάμεσα στην χωρική ανάλυση και στα παράγωγα της γεωμορφομετρικής ανάλυσης
- Εύρεση της βέλτιστης κλίμακας (optimum scale)

Στο σημείο αυτό, δίνεται η αφορμή προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι έννοιες της χωρικής ανάλυσης και της κλίμακας, στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Σύμφωνα με τους Quattrochi & Goodchild (1997), «η κλίμακα είναι μία συγκεκριμένη έννοια, συχνά πολύπλοκη, που μπορεί να σημαίνει διαφορετικά πράγματα, ανάλογα το πλαίσιο και την οπτική γωνία, που εξετάζεται» (Li et al., 2005, p.191). Η κλίμακα μπορεί να είναι χωρική ή χρονική. Ωστόσο, στον τομέα των γεωεπιστημών, η διάσταση της κλίμακας που εξετάζεται είναι η χωρική και ειδικότερα το μεσαίο τμήμα του φάσματός της, που είναι η γεωγραφική (**Εικόνα 4**). Η γεωγραφική έννοια υπεισέρχεται στους παραδοσιακούς τοπογραφικούς χάρτες, όπου η πληροφορία της κλίμακας προστίθεται για να υποδείξει την αναλογία του μήκους στον χάρτη, με το αντίστοιχο μήκος στην πραγματικότητα. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, όπως και ο τοπογραφικός χάρτης, συνδέεται με την κλίμακα, παρά το γεγονός ότι πολλοί ερευνητές ισχυρίζονται ότι δεν υπάρχει κλίμακα σε σύνολα ψηφιακών δεδομένων, αλλά μόνο η έννοια της χωρικής ανάλυσης (Li et al., 2005). Στα ΨΜΥ, η διάσταση του φατνίου, περιγράφει την έννοια της κλίμακας, καθώς αποτελεί τη βασική μονάδα για την μέτρηση και αναπαράσταση της επιφάνειας, αποδίδοντας το επίπεδο της λεπτομέρειας του χάρτη. «Έτσι η χωρική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί ως η μικρότερη απόσταση μέσα στην οποία είναι δυνατόν να καταγραφεί μεταβολή» (Τσουόλος, 2004, σελ. 156). Η χωρική ανάλυση δεν είναι ταυτόσημη έννοια με την κλίμακα, αλλά παρέχει ένδειξη αυτής, καθώς είναι ένα μέτρο της περιεχόμενης πληροφορίας του χάρτη. Η επιλογή της ανάλυσης στο ΨΜΥ, είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι μπορεί να ταιριάζει την αληθινή πληροφορία με το περιεχόμενο των δεδομένων και να ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα στην αναπαράσταση του αναγλύφου, τα οποία είναι αναμενόμενο να υπάρχουν, λόγω των αρχικών μετρήσεων. Εξάλλου, το θέμα της οριζόντιας ανάλυσης των ΨΜΥ, γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπου η χρήση του ψηφιακού μοντέλου αποτελεί το άμεσο στοιχείο εισόδου, δεδομένου ότι η λεπτομερής τοπογραφική έρευνα πεδίου δεν είναι εφικτή. Τέλος, όσον αφορά την έννοια της βέλτιστης κλίμακας, αναφέρεται ότι ο καθορισμός της μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών ή θεωρητικής εξέτασης, όπου κατόπιν της σύγκρισης, ψηφιακών μοντέλων εδάφους διαφορετικής ανάλυσης, προκύπτει η βέλτιστη ανάλυση, για την απόδοση κάποιας εφαρμογής.



Εικόνα 4. Το φάσμα της χωρικής κλίμακας

Πηγή: Li et al., 2005

1.3. Υδρολογικές Εφαρμογές Βάσει Ψηφιακών Δεδομένων

Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems), στην διαχείριση χωρικών δεδομένων υδρολογικού ενδιαφέροντος είναι ολοένα και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια και επιτρέπει την αντιμετώπιση ποικίλων υδρολογικών προβλημάτων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Η αυτόματη εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής από ΨΜΥ σε raster μορφή, είναι ταχύτερη, λιγότερο υποκειμενική και παρέχει στον χρήστη μετρήσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα στον υπολογισμό παράγωγων υδρολογικών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνικές που εφαρμόζονται μέσω των συστημάτων αυτών εξυπηρετούν την υλοποίηση ποικίλων εφαρμογών που σχετίζονται με ζητήματα υδρολογικού ενδιαφέροντος και ορισμένες από αυτές παρατίθεται παρακάτω:

- Σχεδιασμός υδρογραφήματος απορροής
- Παρεμβολή και επιφανειακή ολοκλήρωση υδρολογικών μεταβλητών
- Μελέτη της ακτινοβολίας και της δυνητικής διάρκειας ηλιοφάνειας σε λεκάνη απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την σκίαση και τις κλίσεις του ανάγλυφου
- Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών και υδρολογικών ιδιοτήτων της λεκάνης απορροής
- Χωροχρονική εκτίμηση πλημμυρών
- Μελέτη υποβάθμισης του περιβάλλοντος (χρήσεις γης, φαινόμενα ρύπανσης κ.τ.λ.)

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Βασικό στάδιο της εργασίας, αποτέλεσε ο καθορισμός της περιοχής μελέτης. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η εν λόγω περιοχή, ενώ επιπλέον καταγράφονται τα κριτήρια, τα οποία οδήγησαν στην επιλογή της.

2.1. Διερεύνηση για τον Καθορισμό της Περιοχής Μελέτης

Ο καθορισμός της περιοχής μελέτης έγινε με γνώμονα το ενδιαφέρον από άποψη γεωμορφολογίας και κυρίως υδρογραφικών χαρακτηριστικών, την άμεση απόκτηση δεδομένων υψομετρικής πληροφορίας, καθώς και την ύπαρξη διαθέσιμων μελετών για την περιοχή, ώστε να παρέχεται μία γενική εικόνα των επικρατούντων γεωμορφομετρικών στοιχείων της. Είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι η συλλογή της υψομετρικής πληροφορίας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί από δεδομένα συστημάτων τηλεπισκόπησης, προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις ακρίβειας και παράλληλα να είναι εύκολη και άμεση η άντληση της διατιθέμενης πληροφορίας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη έρευνα στην Βόρεια Αμερική, προκειμένου να επιτευχθεί η αναγνώριση και ο ορισμός της κατάλληλης περιοχής. Η αναζήτηση της υποψήφιας λεκάνης απορροής προσανατολίστηκε στην περιοχή της Αμερικής, δεδομένου ότι, η χώρα αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη τοπογραφίας και επιπλέον, διαθέτει διαθέσιμα γεωμορφολογικά δεδομένα, τα οποία παρέχονται άμεσα από υπηρεσίες και διαδικτυακούς τόπους. Κατά την διεξαγωγή της έρευνας για εντοπισμό της περιοχής μελέτης, διερευνήθηκαν λεκάνες απορροής σε εξω-αστικά και εθνικά πάρκα των Ηνωμένων Πολιτειών, με κύριο γνώμονα την διάθεση δεδομένων από εναέρια συστήματα laser (LiDAR- Light Detection and Ranging), καθώς και την άμεση απόκτησή τους. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι, η διαδικασία της έρευνας διευκολύνθηκε σε μεγάλο βαθμό, λόγω της ύπαρξης υπηρεσιών οι οποίες παρέχουν στον χρήστη άμεση πρόσβαση στα δεδομένα. Οι υπηρεσίες που συνέβαλαν στον προσδιορισμό της περιοχής μελέτης, μέσω των αξιοποιήσιμων πληροφοριών τους, ήταν η United States Geological Survey (U.S.G.S.) και ο διαδικτυακός τόπος του Open Topography. Συνοπτικά, αναφέρεται ότι η U.S.G.S. αποτελεί δημόσιο χαρτογραφικό και γεωδαιτικό οργανισμό, ο οποίος παρέχει αντικειμενική πληροφόρηση σχετικά με θέματα που αφορούν το περιβάλλον και τη μορφή της γήινης επιφάνειας, ενώ το Open Topography παρέχει δεδομένα στον τομέα της έρευνας και της τεχνολογίας και την επιχειρησιακή του υποστήριξη έχουν ένα σύνολο φορέων των Ηνωμένων Πολιτειών.

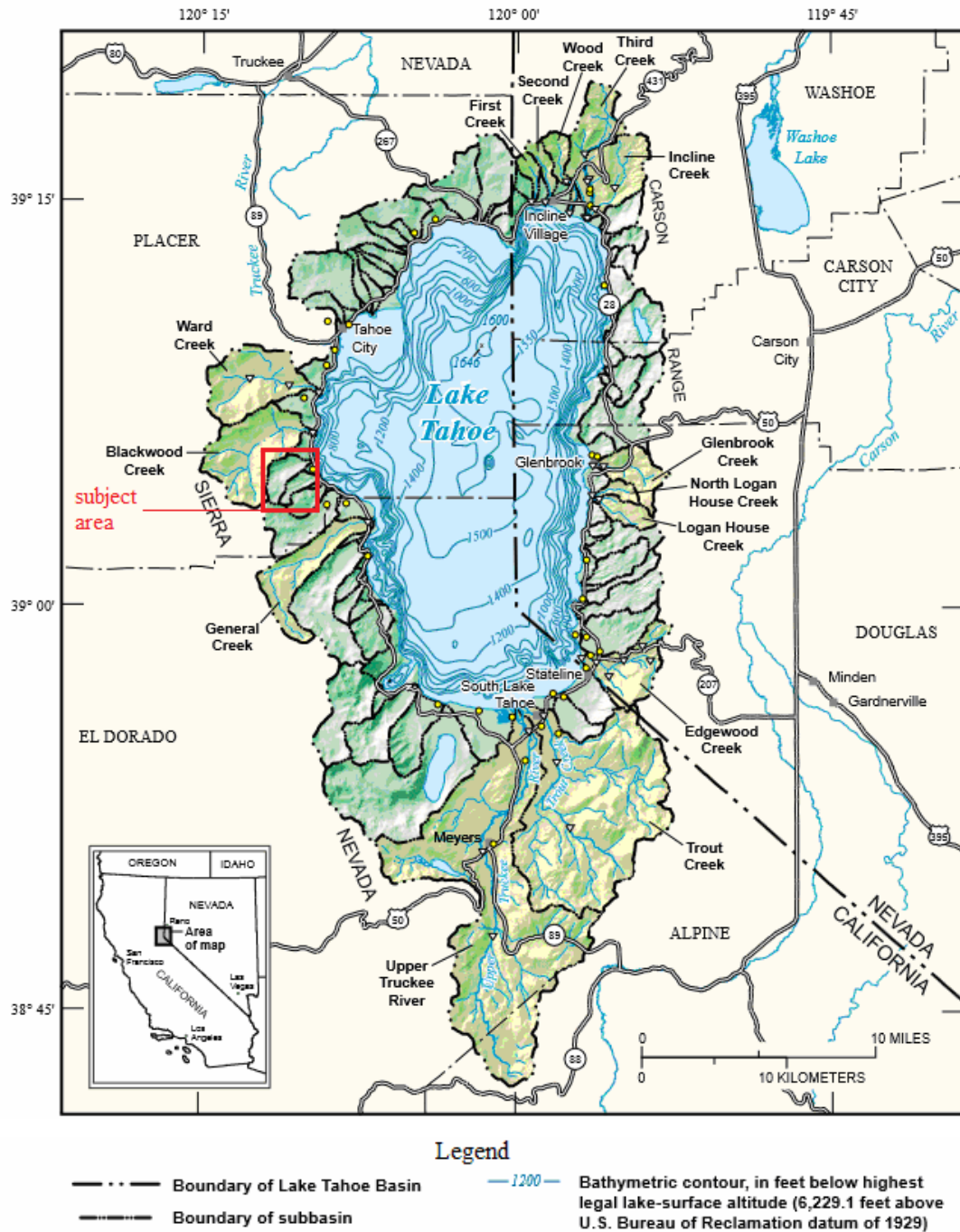
2.2. Τα Κριτήρια Προσδιορισμού της Περιοχής και η Συλλογή των Δεδομένων

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της διερεύνησης, αλλά και βάσει καθορισμένων κριτηρίων επιλογής, ορίστηκε η περιοχή μελέτης, η οποία αποτελεί υπολεκάνη της λεκάνης απορροής της λίμνης Ταχός και χωροθετείται δυτικά της λίμνης, κοντά στην πόλη Homewood, της Καλιφόρνια (**Εικόνα 5**). Πρόκειται για ένα τμήμα της επιφάνειας του εδάφους, στο οποίο συγκεντρώνονται τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, τα οποία καταλήγουν στο ποτάμι Madden, το οποίο εκβάλλει στην λίμνη Ταχόη. Η υπό εξέταση

λεκάνη απορροής συνορεύει με την λεκάνη απορροής του Blackwood ποταμού και του Second ποταμού, στη βόρεια και νότια κατεύθυνση, αντίστοιχα. Κριτήρια για την επιλογή της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής, του ποταμού Madden, αποτέλεσαν τα παρακάτω:

- Η διαθεσιμότητα δεδομένων LiDAR
- Γεωμορφομετρικά και υδρογραφικά χαρακτηριστικά
- Φυσικοί πόροι της περιοχής
- Ύπαρξη υφιστάμενων μελετών για την περιοχή μελέτης

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή της περιοχής μελέτης, αποτέλεσε η δυνατότητα διάθεσης δεδομένων από δορυφορικά συστήματα (remote sensing systems), προκειμένου να είναι εφικτή η επεξεργασία και κατ' επέκταση η γεωμορφομετρική ανάλυση των χαρακτηριστικών της περιοχής. Όσον αφορά το ανάγλυφο, αναφέρεται ότι το υδρογραφικό δίκτυο, καθώς και οι φυσικοί πόροι της περιοχής αποτέλεσαν κριτήρια προσδιορισμού της λεκάνης. Υπό το πρίσμα αυτό, επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του ποταμού Madden, δεδομένου ότι παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Ο συνδυασμός έντονων έως ήπιων κλίσεων με το πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο παρακινούν το ενδιαφέρον για μελέτη τόσο των τοπογραφικών χαρακτηριστικών, όσο και των διεργασιών που συντελούνται στην επιφάνεια. Επιπροσθέτως, μια ακόμη παράμετρος που λήφθηκε υπόψη ήταν η μικρή έκταση της περιοχής μελέτης, επιδιώκοντας τη διευκόλυνση στη διαχείριση των δεδομένων LiDAR από τα λογισμικά εφαρμογής, που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία. Ακόμη, διευκρινίζεται ότι η συλλογή των δεδομένων LiDAR, έγινε μέσω του διαδικτυακού τόπου Open Topography και αφορά νέφη σημείων του εδάφους, υψηλής ακρίβειας τα οποία καταγράφονται από τους δέκτες laser, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, παρέχοντας άμεση γεωαναφορά μετρήσεων υψομέτρων υψηλής ακρίβειας (τυπική ακρίβεια: υψομετρική 0,2-1 m και οριζοντιογραφική 1 m), οι οποίες μετά από επεξεργασία οδηγούν στην παραγωγή υψηλής ακρίβειας ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Επιπλέον, οι εν λόγω δέκτες παρέχουν την δυνατότητα απόκτησης μεγάλου όγκου μετρήσεων που οδηγούν στην παραγωγή νέφους υψομετρικών σημείων υψηλής πυκνότητας, σε πολύ γρήγορο χρόνο. Τέλος, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες (X,Y), της εν λόγω περιοχής ανήκουν στο γεωδαιτικό σύστημα της Βόρειας Αμερικής του 1983 (Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 10 N of North American Datum 1983), ενώ τα ορθομετρικά υψόμετρα (Z), στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς της Βόρειας Αμερικής του 1988 (North American Vertical Datum 1988).



Εικόνα 5. Χάρτης της Λίμνης Ταχός

Πηγή: <http://topomaps.usgs.gov/index.html> , επισυνάφθηκε στις 20/12/13

2.3. Γενικά Στοιχεία

2.3.1. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή της λίμνης Ταχός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη γεωμορφολογίας, αλλά και φυσικού περιβάλλοντος. Η λίμνη Ταχόη (coordinates: 39°05'30"N, 120°02'30"W) είναι μια μεγάλης έκτασης λίμνη γλυκού νερού, στην περιοχή

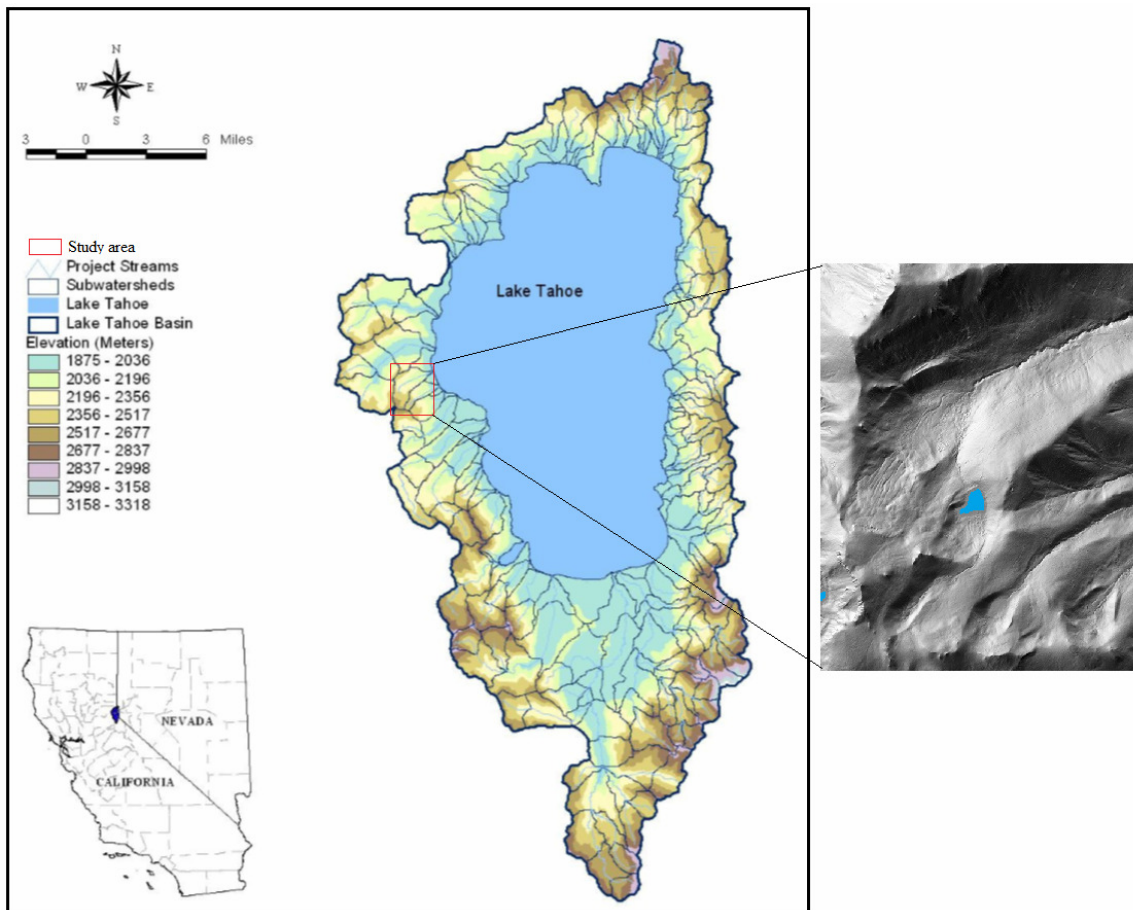
Σιέρα Νεβάδα των Ηνωμένων Πολιτειών. Η λίμνη χωροθετείται κατά μήκος των συνόρων μεταξύ της Καλιφόρνια και της Νεβάδα, δυτικά της πόλης Carson. Είναι η μεγαλύτερη αλπική λίμνη της Βόρειας Αμερικής, σε υψόμετρο επιφάνειας 1.897 m, ενώ το μεγαλύτερο βάθος της εντοπίζεται στα 501 m (μέσο βάθος 300 m), κατατάσσοντας την στην δεύτερη βαθύτερη λίμνη των Ηνωμένων Πολιτειών και στην ενδέκατη βαθύτερη λίμνη του κόσμου. Έχει 35 km μήκος και 19 km πλάτος, η περίμετρος της ακτογραμμής της είναι 116 km, ενώ καταλαμβάνει συνολική έκταση επιφάνειας 490 km². Η λεκάνη απορροής της Λίμνης έχει έκταση 1310 km², εκ της οποίας το 38% καταλαμβάνει η επιφάνεια της λίμνης. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής της εντοπίζονται περισσότερες από 150 λίμνες και 64 υπολεκάνες απορροής, όπως αυτές διαμορφώνονται από τα συμβάλλοντα ρέματα. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 650 χρόνια, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται ένα διάστημα, κατά μέσο όρο, 650 χρόνων προκειμένου το νερό που εισέρχεται στη λίμνη να απομακρυνθεί από αυτή. Ο μεγαλύτερος παραπόταμος στην περιοχή της λίμνης είναι ο Upper Truckee River, ο οποίος μεταφέρει περίπου το 25% της ετήσιας απορροής. Η λίμνη έχει μία έξοδο στην βορειοδυτική πλευρά της, σχηματίζοντας την έναρξη του ποταμού Truckee, ο οποίος τελικά εκβάλλει στην Pyramid Lake, μια λίμνη τερματική, που βρίσκεται στη Νεβάδα. Η ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης κυμαίνεται από 760 mm στην ανατολική της πλευρά έως 1780 mm στην δυτική της, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της απορρίπτεται κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος έως Απρίλιος). Η μέση ετήσια συνολική βροχόπτωση είναι 832 mm, εκ των οποίων μόλις τα 62 mm συγκεντρώνονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Το χειμώνα, η μέση θερμοκρασία του αέρα είναι -0,6°C και η μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία είναι -6,4°C. Το καλοκαίρι, η μέση θερμοκρασία του αέρα είναι 14,7°C και η μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία είναι 23,6°C. Όσον αφορά την γεωλογία της περιοχής αναφέρεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της αποτελείται από πυριγενή πετρώματα, καθώς και γρανιτικά πετρώματα κατά μήκος των νότιων και ανατολικών ακτών της λίμνης, ενώ κατά μήκος της βόρειας ακτής εμφανίζονται ηφαιστειογενή πετρώματα. Οι γήινες ανυψώσεις της λεκάνης απορροής της λίμνης οφείλονται στην οροσειρά Carson Range και στην οροσειρά Sierran Crest από ανατολικά και δυτικά, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη ρηγμάτων και η διάβρωση των εδαφών λόγω του παγετού έχουν ως αποτέλεσμα η λεκάνη της λίμνης να χαρακτηρίζεται από τραχιά τοπογραφία, με απότομες πλαγιές και στενά φαράγγια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι περίπου τα μισά από τα εδάφη της λεκάνης βρίσκονται σε κλίσεις μεγαλύτερες από 20%. Ακόμη, οι εκτάσεις της δυτικής πλευράς παραμένουν καλυμμένες από τον παγετό για το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου, ενώ η βόρεια και η ανατολική πλευρά δεν υφίσταται την παγετώδη κάλυψη και χαρακτηρίζονται από στενές κοιλάδες κοντά στα ρέματα. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1950, η ευρύτερη περιοχή της λίμνης Ταχός έχει υποβληθεί σε ταχεία ανάπτυξη, για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών. Οι επικρατούσες χρήσεις γης συμβάλλουν μεν στην ανάπτυξη της περιοχής, επιβαρύνουν δε το φυσικό της περιβάλλον. Πολλές ακατάλληλες χρήσεις γης κυριαρχούν, με αποτέλεσμα να επιφέρουν καταστροφές του φυσικού τοπίου, ευθυγράμμιση και ρύπανση των ρεμάτων, καταπάτηση των πλημμυρικών ζωνών και διαταραχή της φυσικής αποστράγγισης. Πιο αναλυτικά, στην περιοχή της λεκάνης διακρίνονται υδάτινα σώματα, εκτεταμένες δασικές εκτάσεις, κατοικίες και συγκροτήματα κατοικιών, καθώς και υποδομές-συγκοινωνίες που διευκολύνουν την

εμπορική και αγροτική δραστηριότητα. Πολλές περιβαλλοντικές μελέτες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τη ρύπανση της λίμνης, η οποία εκδηλώνεται μέσα από τη μείωση της διαύγειας των υδάτων της. Η ποιότητα των υδάτων της λίμνης Ταχός έχει αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικής έρευνας, προσανατολίζοντας τον ενδιαφέρον στις αιτίες που προκαλούν την επιβάρυνση του συστήματός της. Σύμφωνα με μελέτες, η απόρριψη αιωρούμενων ιζημάτων μέσω των παραποτάμιων ρεμάτων και οι αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων έχουν αλλοιώσει την ακεραιότητα του νερού στην λίμνη. Επιπλέον, η αύξηση του ποσοστού παραγωγής και μεταφοράς διαβρωμένου υλικού σε συνδυασμό με ένα σύνολο παραγόντων που παρατηρούνται στην λεκάνη, έχουν επιδεινώσει σε σημαντικό βαθμό το υδατικό σύστημα της λίμνης. Πιο συγκεκριμένα, η μεταφορά των υλικών έχει επιταχυνθεί σταδιακά τόσο από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως είναι η αστικοποίηση των υγροτόπων, η υπερβόσκηση, η υλοτομία, ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση υποδομών, όσο και εξαιτίας των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του εδάφους. Η ύπαρξη έντονων κλίσεων, η εγγενής δομή και η διαπερατότητα του εδάφους, το πορώδες καθώς και ο ρυθμός διήθησης αποτελούν ορισμένες παραμέτρους που επηρεάζουν την απορροή και κατ' επέκταση την εναπόθεση διαβρωμένου υλικού στη λίμνη. Συνεπώς, παρατηρείται ότι το είδος του εδάφους, και ειδικότερα η διείσδυση του νερού στο έδαφος, αλλά και η διανομή και η πυκνότητα της βλάστησης ελέγχουν την ταχύτητα της ροής και την απόδοση των ιζημάτων στην λίμνη. Τέλος, επισημαίνεται ότι η εκδήλωση πυρκαγιών σε δασικές εκτάσεις της λεκάνης απορροής της λίμνης έχει επιφέρει αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή, επηρεάζοντας άμεσα τη διαδικασία της απορροής μέσω των ρυακιών και χειμάρρων.

2.3.2. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Madden

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Madden (*Εικόνα 6*) βρίσκεται σε υψόμετρο από 6.000-7.000 πόδια (1.829-2.134 m), στην ζώνη γεωγραφικού πλάτους 39°0'0''-39°10'0'' και γεωγραφικού μήκους 120°0'0''-120°10'0'', και ως προς την τοπογραφία χαρακτηρίζεται από ομαλές πλαγιές βουνών με στρογγυλεμένες κορυφογραμμές, και επικρατούσες κλίσεις έως και 50%. Σε μεγάλα υψόμετρα, πάνω από 7.600 πόδια (2.317 m), τα εδάφη είναι ρηχά και πετρώδη με χαμηλές δυνατότητες αποθήκευσης της υγρασίας (1-3 ίντσες ή 2,54-7,62 cm), ενώ κάτω από αυτό το υψόμετρο, το έδαφος συνίσταται από αμμώδη εύφορα εδάφη, με 4-5 πόδια (1-1,5 m) βάθος, με 30-50% περιεκτικότητα σε πέτρες (πετρώδεις σχηματισμοί) και με ικανότητα συγκράτησης σε νερό, από 3 έως 6 ίντσες (7,62-15,24 cm). Η περιοχή μελέτης ανήκει σε εδάφη τα οποία χαρακτηρίζονται ως καλά στραγγιζόμενα και μέτρια καλά στραγγιζόμενα, που έχουν χαμηλούς συντελεστές διείσδυσης του νερού (0,05 έως 0,15 ίντσες ανά ώρα ή 0,127-0,381 cm- αργά διαπερατά έως πολύ αργά διαπερατά- με βάθος 20-40 ίντσες ή 50-100 m), μια αργή ταχύτητα μεταφοράς και μετρίως υψηλό δυναμικό απορροής. Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με μελέτες, στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής εμφανίζεται πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων, ενώ η αραιή βλάστηση και τα ρηχά εδάφη εντείνουν την διαδικασία της απορροής, η οποία με τη σειρά της επιφέρει διάβρωση και εναπόθεση υλικού στα ρέματα και μέσω αυτών στον τελικό αποδέκτη ο οποίος είναι η λίμνη.

Ωστόσο, επισημαίνεται ότι τα εδάφη της περιοχής μελέτης έχουν μικρή πιθανότητα διάβρωσης σε σχέση με άλλα τμήματα της λεκάνης απορροής της λίμνης Ταχός. Επιπλέον, το διαμορφωμένο περιβάλλον καθίσταται ευάλωτο στην εμφάνιση πλημμύρας, στα χαμηλά τμήματα της λεκάνης. Ως προς τη βλάστηση, η περιοχή χαρακτηρίζεται από έλατα σε μεγάλα υψόμετρα και μικτά κωνοφόρα σε χαμηλά υψόμετρα, κοντά στη λίμνη. Όσον αφορά τους περιορισμούς ως προς τις χρήσεις γης, τονίζεται ότι η χαμηλή ευστάθεια πρανών και η πιθανότητα κινδύνου από τις πλημμύρες θέτουν ένα περιοριστικό πλαίσιο στην ανάπτυξη και διατήρηση διαφόρων δραστηριοτήτων. Βάσει των στοιχείων αυτών, η περιοχή της λεκάνης απορροής του Madden ποταμού κρίνεται ακατάλληλη για αστικοποίηση και εντατική δασοπονία, και εμφανίζεται καταλληλότερη σε χαμηλής έντασης δραστηριότητες, που διαφυλάσσουν την ιδιαιτερότητα του περιβάλλοντός της. Τέλος, το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης διαμορφώνεται κυρίως από ηφαιστειογενή πετρώματα (βασάλτης και ανδεσίτης), σε μικρότερο ποσοστό από νεότερες αλλουβιανές προσχώσεις (λάσπη, άμμος, χαλίκι, πέτρες), αλλά και σε ένα ελάχιστο ποσοστό από ιζηματογενή πετρώματα (ψαμμίτης και ασβεστόλιθος), τα οποία σχηματίζουν ένα υπόγειο υπόστρωμα.



Εικόνα 6. Οι υπολεκάνες απορροής της λίμνης Ταχός - Ορισμός περιοχής μελέτης

Πηγή: Roberts, 2007

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στην ενότητα αυτή, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, με στόχο την εφαρμογή και κατόπιν την επίτευξη του επιδιωκόμενου σκοπού, της παρούσας εργασίας. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει κυρίως τα επιμέρους στάδια της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, τα οποία αποσκοπούν στην δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους και κατόπιν στην εξαγωγή παραμέτρων και αντικειμένων της φυσικής γήινης επιφάνειας, από αυτά.

3.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων

Αξιοποιώντας την υψομετρική πληροφορία, που εμπεριέχεται στα νέφη σημείων, εφαρμόζεται η διαδικασία της παρεμβολής, με σκοπό την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

3.1.2. Παρεμβολή

Η παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων, για τον υπολογισμό των γεωμορφομετρικών παραμέτρων, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της παρεμβολής. Η παρεμβολή είναι μια μαθηματική επεξεργασία, η οποία αξιοποιεί το σύνολο των μετρούμενων σημείων, για την αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους. Πίσω από την τεχνική της συναντώνται δύο έμμεσες υποθέσεις: α) η επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει συνέχεια και β) εντοπίζεται υψηλή συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών σημείων. Πρόκειται ουσιαστικά για μία διαδικασία απόδοσης της γεωμετρίας του εδάφους, που πραγματοποιείται μέσα από τη δόμηση της τοπολογίας των διαθέσιμων δεδομένων και την εφαρμογή ενός μοντέλου παρεμβολής, για την εκτίμηση της μορφής των γήινων σχηματισμών. Είναι αξιοσημείωτο ότι η βασική τεχνική της παρεμβολής εμπλέκεται στα διάφορα στάδια της μοντελοποίησης όπως είναι ο ποιοτικός έλεγχος, η ανακατασκευή της επιφάνειας, η αξιολόγηση της ακρίβειας, η ανάλυση του εδάφους και οι εφαρμογές.

➤ Επιλογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής

Σχετικά με τα κριτήρια επιλογής της μεθόδου σημειώνεται ότι η δημιουργία ενός κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής, το οποίο θα ακολουθεί τη γεωμετρική συμπεριφορά της γήινης επιφάνειας, εξαρτάται άμεσα από την πολυπλοκότητα του αναγλύφου και την ακρίβεια των δεδομένων καταγραφής. Επομένως για την επιλογή του αλγορίθμου παρεμβολής θεωρείται σημαντική η επίτευξη των παρακάτω:

- ✓ Ανάδειξη των θεμελιωδών χαρακτηριστικών του εδάφους και επαρκής απόδοση της χωρικής κατανομής των δεδομένων, μέσω της συνάρτησης παρεμβολής
- ✓ Ακρίβεια, όπως ορίζεται από την εφαρμογή
- ✓ Ευελιξία και αποτελεσματικότητα στην ερμηνεία του παραγόμενου μοντέλου

➤ **Μέθοδος αντιστρόφου απόστασης (inverse distance weighted)**

Η μέθοδος αντιστρόφου απόστασης επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στα νέφη σημείων, με σκοπό να αποδοθούν οι τιμές στους κόμβους ενός καννάβου με καθορισμένα όρια και μέγεθος πλέγματος. Αναλυτικότερα, ο υπολογισμός της τιμής του υψομέτρου στο ζητούμενο σημείο (σημείο στον κόμβο του καννάβου) δίνεται ως ο μέσος όρος των σημείων, για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις και επιπλέον βρίσκονται εντός της γειτονίας του μη μετρούμενου σημείου. Ο μέσος όρος έχει υπολογιστεί από έναν αλγόριθμο, ο οποίος αποδίδει ως συντελεστές βαρύτητας στα σημεία των δεδομένων, το αντίστροφο του τετράγωνου της απόστασής τους, από το μη μετρούμενο. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι η βασική ιδέα της ανάθεσης του βάρους σε ένα σημείο αναφοράς είναι να εξετάσει την επίδραση του σημείου αναφοράς και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια συνάρτηση απόστασης, έτσι ώστε όσο μικρότερη είναι η απόσταση, τόσο μεγαλύτερο να είναι το βάρος. Ο ορθολογικός υπολογισμός της τιμής στην εκάστοτε ζητούμενη θέση πραγματοποιείται μέσω της σχέσης:

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n w(d_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w(d_i)} \quad (1)$$

Όπου: $f(x, y)$: η εκτιμώμενη τιμή της παραμέτρου στο σημείο (x, y)

$w(d_i)$: η συνάρτηση βάρους ($w(d_i)=1/d_i^r$)

z_i : η τιμή της παραμέτρου που έχει μετρηθεί στο σημείο i

d_i : η απόσταση του σημείου i από το σημείο (x, y)

n : ο αριθμός των σημείων του δείγματος και

r : η δύναμη (εκθέτης) του βάρους του αντιστρόφου της απόστασης ($r=2$)

Στην πραγματικότητα, η τιμή του r ελέγχει την περιοχή επιρροής της κάθε μιας από τις περιοχές δειγματοληψίας. Όσο η τιμή του r αυξάνει, η περιοχή επιρροής μικραίνει, ενώ όταν η τιμή του r τίθεται ίση με μηδέν, η μέθοδος ανάγεται στον απλό υπολογισμό της μέσης τιμής του δείγματος.

3.2. Προεπεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων

Σύμφωνα με την θεωρία που διέπει την γεωμορφομετρική ανάλυση, η διαδικασία της προεπεξεργασίας είναι αναγκαία, και στην παρούσα διπλωματική, περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός φίλτρου εξομάλυνσης (φίλτρο Gauss) και την συμπλήρωση των βυθισμάτων, σε κάθε ψηφιακό μοντέλο.

3.2.1. Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης (Gaussian Filter)

Η εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης πραγματοποιήθηκε μέσω του φίλτρου Gauss, δηλαδή ενός τελεστή, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εξομάλυνση (smoothing) των ψηφιακών δεδομένων και την βελτίωση της ποιότητας. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση

του εν λόγω φίλτρου επιτυγχάνεται η «θόλωση» και παράλληλα, η αφαίρεση της λεπτομέρειας και του θορύβου των δεδομένων. Η έννοια του τυχαίου θορύβου σχετίζεται με την έννοια των τυχαίων σφαλμάτων. Στην κλασική θεωρία σφαλμάτων, η μεταβλητότητα των μετρήσεων μιας ενιαίας ποσότητας οφείλεται σε σφάλματα παρατήρησης. Τέτοιου είδους σφάλματα δεν ακολουθούν κανένα αιτιοκρατικό κανόνα (αιτιώδη συνάφεια), οδηγώντας έτσι στην έννοια των τυχαίων σφαλμάτων. Η διαδικασία του φιλτραρίσματος επιλέχθηκε κυρίως για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων αυτών, ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις τους. Το φίλτρο Gauss βασίζεται σε μία λειτουργία συνέλιξης, με καθορισμένη ακτίνα εφαρμογής του φίλτρου και συγκεκριμένη τυπική απόκλιση. Η επιλεγμένη ακτίνα κύκλου καθορίζει το μέγεθος της μήτρας του συνόλου των κελιών που λαμβάνονται υπόψη, ενώ η τυπική απόκλιση ελέγχει την ένταση της εξομάλυνσης. Όσο η ακτίνα αυξάνεται τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των γειτονικών τιμών που θα ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της νέας τιμής του κεντρικού κελιού. Αντίστοιχα, αύξηση της τυπικής απόκλισης ερμηνεύεται ως αύξηση του βαθμού εξομάλυνσης.

3.2.2. Συμπλήρωση των Βυθισμάτων (Fill Sinks)

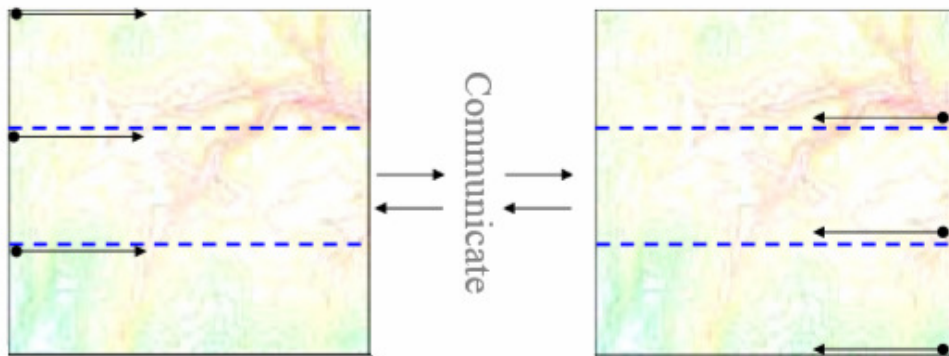
Θεμελιώδες στάδιο της προεπεξεργασίας ενός ψηφιακού μοντέλου, αποτελεί η αναγνώριση και απομάκρυνση των τοπογραφικών βυθισμάτων, βάσει της υψομετρικής πληροφορίας, που περιέχεται σε κάθε φατνίο του καννάβου. Η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων οδηγεί στον σχηματισμό τεχνητών βυθισμάτων, η ύπαρξη των οποίων εμποδίζει την ορθή αναπαράσταση των διαδρομών ροής του ύδατος, στο ψηφιακό μοντέλο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ασύνδετα υδάτινα σώματα και υπολεκάνες απορροής χωρίς στόμιο εξόδου. Η πλήρωση των βυθισμάτων αποτελεί πρωταρχική ενέργεια πριν την εξαγωγή υδρογραφικών χαρακτηριστικών, καθώς αν δεν απομονωθούν δημιουργούνται καταβόθρες στο μοντέλο, που απομονώνουν τα τμήματα της λεκάνης. Οι κοιλότητες που εντοπίζονται μπορεί να είναι τεχνητές και πραγματικές. Η εμφάνιση των τεχνητών κοιλοτήτων οφείλεται σε ένα σύνολο παραγόντων που αφορούν τα σφάλματα δειγματοληψίας, την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων κατά τη διαδικασία της παρεμβολής, καθώς και τις επιδράσεις της εξομάλυνσης, λόγω εφαρμογής του φίλτρου. Επίσης, τέτοιου είδους κοιλότητες συνδέονται άμεσα με την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια, των αρχικών δεδομένων, καθώς και με τις μεταβολές που παρατηρούνται στην επιφάνεια του αναγλύφου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, τα τεχνητά βυθίσματα συναντώνται συχνά σε περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο, γεγονός που αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στην περιορισμένη κατακόρυφη ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων. Επιπλέον, σύμφωνα με έρευνες έχει αποδειχθεί ότι υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων από δεδομένα LiDAR, περιέχουν μεγάλο αριθμό βυθισμάτων λόγω μικρού μεγέθους ψηφίδας. Αντιθέτως, οι πραγματικές κοιλότητες εκπροσωπούν περιοχές φυσικής εναπόθεσης ή τεχνητές αλλοιώσεις τοπίου, που οφείλονται σε ανθρώπινη παρέμβαση. Φυσικές κοιλότητες μπορεί να επικρατούν σε πρόσφατα παγωμένες δασικές περιοχές ή σε λίμνες, ενώ τεχνητές δομές, όπως λεκάνες συγκράτησης ροής ή λατομεία, σε εξωαστικό περιβάλλον. Κατά κανόνα, αυτού του είδους οι κοιλότητες παρουσιάζονται πιο

σπάνια σε σχέση με τις τεχνητές ή σχεδόν απουσιάζουν (Zandbergen, 2006). Στην εν λόγω περιοχή, βάσει βιβλιογραφικής έρευνας δεν εντοπίζονται φυσικά βυθίσματα και σε μεγάλο βαθμό το γεγονός αυτό οφείλεται στην κάλυψη των βυθισμάτων από τις ποτάμιες διεργασίες διάβρωσης της περιοχής. Η αντιμετώπιση των τοπογραφικών βυθισμάτων επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με την χρήση του αλγορίθμου Planchon & Darboux, (2001), διότι παρέχει βελτιωμένη απόδοση του χρόνου εκτέλεσης σε μεγάλου όγκου δεδομένα. Στόχος της διαδικασίας είναι η συμπλήρωση των βυθισμάτων προκειμένου να επιτευχθεί σωστή προσομοίωση της ροής από τις ανάντη προς τις κατόντη περιοχές. Η λειτουργία του αλγορίθμου στηρίζεται στην πλήρωση των εσοχών μέχρι το χαμηλότερο υψόμετρο που εντοπίζεται στην γειτνίαση του κελιού, το οποίο παρουσιάζει το βύθισμα.

➤ **Αλγόριθμος συμπλήρωσης βυθισμάτων των Planchon & Darboux (2001)**

Ο αλγόριθμος αποτελεί μία καινοτόμα προσέγγιση πλήρωσης των βυθισμάτων και παρά την πολυπλοκότητα του πλεονεκτεί έναντι των υφιστάμενων μεθόδων. Κατά κύριο λόγο συνίσταται στην εκτέλεση υπολογισμών δύο σταδίων: αρχικά η επιφάνεια του ΨΜΥ θεωρείται ότι καλύπτεται από ένα παχύ στρώμα νερού, το οποίο γεμίζει τα βυθίσματα, και στη συνέχεια αφαιρείται η ποσότητα που βρίσκεται σε περίσσεια (Planchon & Darboux, 2001). Ο αλγόριθμος ξεκινά ορίζοντας μία μεταβατική επιφάνεια, στην οποία τα φατνία χαρακτηρίζονται από άπειρη (ή πολύ μεγάλη) τιμή υψομέτρου. Γύρω από τα όρια του πλέγματος (σημεία καθορισμένης τιμής υψομέτρου), τα υψόμετρα της μεταβατικής επιφάνειας μειώνονται προκειμένου να ταιριάξουν στην ανύψωση του αρχικού μοντέλου. Η εφαρμογή εκτελεί μια σειρά συνεχόμενων σαρώσεων στο υπόλοιπο μοντέλο. Κατά την διάρκεια κάθε σάρωσης, ο αλγόριθμος ελέγχει στο κελί το υψόμετρο των γειτονικών του φατνίων, προκειμένου να καθοριστεί το γειτονικό κελί με το χαμηλότερο υψόμετρο. Εάν η αρχική ανύψωση είναι μεγαλύτερη ή ίση από αυτή του χαμηλότερου γειτονικού φατνίου, τότε τίθεται στο κελί η τιμή του αρχικού υψομέτρου. Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή του φατνίου τίθεται ίση με τη χαμηλότερη τιμή του γειτονικού κελιού. Κατά συνέπεια, δημιουργείται ένα διορθωμένο ΨΜΥ, στο οποίο οι τιμές των υψομέτρων των φατνίων είναι ίσες ή μεγαλύτερες από εκείνες του αρχικού μοντέλου. Ακόμη, επισημαίνεται ότι κάθε σάρωση αποτελεί ένα συνδυασμό σάρωσης με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά ή δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω. Η διαδικασία διεξάγεται μέσα από οχτώ συνδυασμούς σάρωσης, διότι μεταβάλλοντας την κατεύθυνση από την οποία γίνεται η προσέγγιση του υψομέτρου ενός φατνίου, αυξάνεται η πιθανότητα γρήγορης επίλυσης του αλγορίθμου, με παράλληλη μείωση του συνολικού αριθμού των επαναλήψεων. Η διαδικασία της σάρωσης σταματά μετά από την σάρωση, στην οποία δεν θα τροποποιηθεί η τιμή κάποιου φατνίου. Για την εξασφάλιση της ορθής εξαγωγής του αποστραγγιστικού δικτύου, είναι πιο πρακτικό η επιφάνεια των βυθισμάτων να εμφανίζει μία ελαφριά κλίση. Για το σκοπό αυτό, ορίζεται μία ελάχιστη θετική διαφορά του υψομέτρου για κάθε μία από τις οχτώ διευθύνσεις σάρωσης που ενώνουν ένα κελί με τα γειτονικά του. Η τιμή της διαφοράς δεν τίθεται ίση με μηδέν, προκειμένου ο αλγόριθμος να διορθώσει το ψηφιακό μοντέλο αφαιρώντας τα βυθίσματα και αποφεύγοντας την ανάπτυξη επίπεδων επιφανειών. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται για κάθε φατνίο ορισμένη κατεύθυνση

στο δίκτυο αποστράγγισης και σύνδεση αυτού με τα όρια του μοντέλου, ακολουθώντας την διαδρομή της φθίνουσας ανύψωσης, προκειμένου να καθορίσει την πορεία της συνεχούς ροής στην γήινη επιφάνεια. Η εφαρμογή του αλγορίθμου γίνεται παράλληλα υλοποιώντας ένα σύστημα όπου το πλέγμα διαιρείται οριζόντια σε p ίσα μέρη και σχεδιάζεται σε p διεργασίες και κάθε τμήμα του πλέγματος που απομένει προσαρτάται στο τελευταίο διαιρεμένο τμήμα (**Εικόνα 7**). Σε κάθε διεργασία αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο τμήμα του ΨΜΥ και διαβάζονται οι τιμές των φατνίων κατά μήκος μιας σειράς ακριβώς πάνω και κάτω από τα τμήματα στα οποία έχει διαιρεθεί το πλέγμα. Κάθε διεργασία επιτρέπεται να έχει πρόσβαση σε όλα τα γειτονικά φατνία και διεξάγεται αυτόνομα, χωρίς να εισάγεται κάποια σχέση που να συνδέει τις επιμέρους διεργασίες. Στα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου ανήκει η αποτελεσματικότητά του και η ευελιξία του σε σχέση με άλλες δημοσιευμένες μεθόδους αντίστοιχων αλγορίθμων, καθώς μπορεί να επεξεργαστεί υψηλής ανάλυσης ΨΜΥ με ένα αποδεκτό χρονικό κόστος. Αντιθέτως, στα μειονεκτημά του εντοπίζεται η δυσκολία κατανόησης της διαδικασίας, που οφείλεται κυρίως σε τρεις πολύπλοκες υπορουτίνες του και στην αναδρομική εκτέλεση τους.



Εικόνα 7. Παράλληλο σύστημα εφαρμογής του αλγορίθμου Planchon & Darboux

Πηγή: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/giswr2010/giswr2010.htm>, επισυνάφθηκε στις 26/12/2013

3.3. Ερμηνεία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Στο παρόν υποκεφάλαιο ορίζονται, και κατόπιν αναλύονται, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου, που επιλέχθηκαν να μελετηθούν για την δεδομένη περιοχή. Γενικότερα, η ερμηνεία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για την εν λόγω περιοχή μελέτης συνίσταται στην απόδοση τόσο των γεωμορφομετρικών όσο και των υδρογραφικών χαρακτηριστικών. Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και οι επιλεγμένοι δείκτες που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή, αποδίδουν με άμεσο τρόπο πληροφορίες για τις υδρολογικές, γεωμορφολογικές και βιολογικές διαδικασίες του εδάφους. Για τον λόγο αυτό, η χρησιμότητά τους είναι πολύτιμη σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών μελετών, που σχετίζονται με τον σχεδιασμό έργων, την πρόβλεψη φαινομένων και την διαχείριση του περιβάλλοντος.

3.3.1. Γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά

Τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την μορφολογία του αναγλύφου και αξιοποιούν απευθείας τα ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα εξομαλύνοντας τους φυσικούς, χρονικούς και οικονομικούς περιορισμούς που τίθενται από την μέτρηση και την διαχείριση δεδομένων πεδίου. Γενικότερα, ο προσδιορισμός και η κατανόηση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, η διάκριση των οποίων γίνεται σε δύο κατηγορίες: τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα, συμβάλλει στην ποσοτική ανάλυση του εδάφους. Στην παρούσα ενότητα, γίνεται λόγος για την φυσική βάση των χαρακτηριστικών αυτών, αλλά και για τις επιλεγμένες μεθόδους υπολογισμού τους.

Πρωτεύοντα Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά (Primary Topographic Attributes)

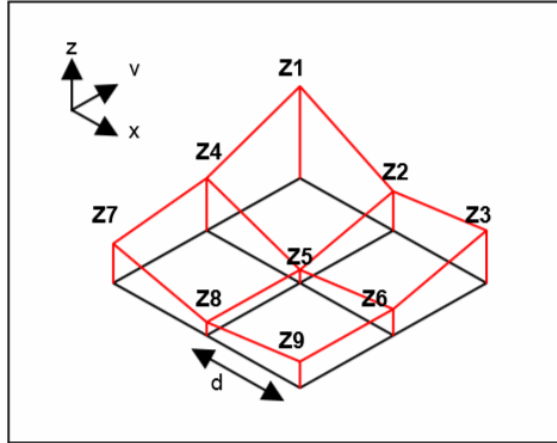
Τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται άμεσα από την διαθέσιμη υψομετρική πληροφορία του μοντέλου και περιλαμβάνουν: την κλίση (slope), την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης (aspect), την καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature), την καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης του προφίλ (profile curvature) και την ανάντη συμβάλλουσα περιοχή αποστράγγισης ανά μονάδα πλάτους του περιγράμματος (catchment area). Επιπλέον, περιγράφουν την μορφολογία του εδάφους και κυρίως αποτελούν την βάση για την υδρολογική μελέτη της περιοχής, καθώς οριοθετούν την λεκάνη απορροής και διαμορφώνουν το αποστραγγιστικό δίκτυο.

Η Μέθοδος των Zenvenbergen & Thorne (1987)

Ο υπολογισμός της κλίσης, των καμπυλοτήτων και της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των Zenvenbergen και Thorne (1987), διότι σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους, παρέχει στον χρήστη την υψηλότερη ακρίβεια και υπολογιστική αποδοτικότητα. Η μέθοδος εκφράζεται μέσω ενός αλγορίθμου, ο οποίος είναι γνωστός ως «αλγόριθμος μέσου όρου», για τον λόγο ότι χρησιμοποιεί έναν αριθμό φατνίων προκειμένου να καθορίσει στο κεντρικό φατνίο, την κλίση, ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό. Ειδικότερα, εφαρμόζεται βάσει μίας πολυωνυμικής προσαρμογής, θεωρώντας μία τετραγωνικής μορφής επιφάνεια, η οποία διέρχεται από εννέα σημεία καθορισμένου υψομέτρου, σε πλέγμα φατνίων 3X3 (**Εικόνα 8**). Η μεθοδολογία αυτή εξετάζει μόνο τέσσερα φατνία (υψομέτρου Z2, Z4, Z6 και Z8), τα οποία είναι γειτονικά με το κεντρικό φατνίο (υψομέτρου Z5). Κατά συνέπεια, είναι εμφανές, ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου περιορίζεται στην τοπική μεταβλητότητα που περιβάλλει το κεντρικό φατνίο, δηλαδή, συνεκτιμά την τοπική διακύμανση του αναγλύφου, από τα υψόμετρα των γειτονικών ψηφίδων του 3X3 παραθύρου.

Η επιφάνεια αναπαρίσταται κατάλληλα με την χρήση της παρακάτω μερικής τετραγωνικής εξίσωσης:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + 1 \quad (2)$$



Εικόνα 8. Το μοντέλο των Zevenbergen & Thorne (1987)

Πηγή: Cadell, 2002

Οι εννέα παράμετροι της πολυωνμικής συνάρτησης υπολογίζονται από τις τιμές των υψομέτρων των εννέα κόμβων, σε ένα 3X3 παράθυρο, βάσει των πολυωνύμων του Lagrange. Επομένως, οι παράμετροι υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9) / 4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8) / 2 + Z_5] / d^4 \quad (3)$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9) / 4 - (Z_2 - Z_8) / 2] / d^3 \quad (4)$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9) / 4 + (Z_4 - Z_6) / 2] / d^3 \quad (5)$$

$$D = [(Z_4 + Z_6) / 2 - Z_5] / d^2 \quad (6)$$

$$E = [(Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / d^2 \quad (7)$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4d^2 \quad (8)$$

$$G = (-Z_4 + Z_6) / 2d \quad (9)$$

$$H = (Z_2 - Z_8) / 2d \quad (10)$$

$$I = Z_5 \quad (11)$$

Στην θεωρία του μοντέλου αυτού, στηρίζεται ο υπολογισμός ορισμένων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, τα οποία περιλαμβάνουν την κλίση, την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης και τις καμπυλότητες.

Υπολογισμός της κλίσης (Slope)

Η κλίση αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής του υψομέτρου του εδάφους, κατά μήκος της απόστασης, και εκφράζεται μέσω της πρώτης παραγώγου του υψομέτρου της πολυωνμικής επιφάνειας των Zevenbergen & Thorne (1987) (Εικόνα 9). Αποτελεί ένα

χαρακτηριστικό ιδιαίτερης σημασίας, τόσο στην γεωμορφολογία, όσο και στην υδρολογία. Διαμορφώνεται από την βαρύτητα και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ροή του νερού και άλλων υλικών στο έδαφος, ελέγχοντας το ρυθμό που δαπανάται η ενέργεια κατά τη ροή, καθώς και την ισχύ των διαθέσιμων ρεμάτων που την καθοδηγούν. Επιπλέον, επηρεάζει την ταχύτητα της επιφανειακής και υπεδάφιας ροής, τον ρυθμό απορροής και κατά συνέπεια την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και την πιθανότητα διάβρωσης, αντίστοιχα.

Ο δείκτης της κλίσης βρίσκεται με παραγωγή της εξίσωσης (2) ως προς S, όπου S είναι η επιφάνεια στην μέγιστη κατεύθυνση της κλίσης, και επίλυσής της για το κεντρικό σημείο του παραθύρου. Επομένως, η σχέση υπολογισμού είναι:

$$Slope = \frac{\partial Z}{\partial S} = G \cos \theta + H \sin \theta \quad (12)$$

Και εφόσον εξ ορισμού ισχύει: $\cos \theta = -G / (G^2 + H^2)^{1/2}$ και $\sin \theta = -H / (G^2 + H^2)^{1/2}$, προκύπτει:

$$Slope = -(G^2 + H^2)^{1/2} \quad (13)$$

Παρότι η μέθοδος εννοιολογικά χρησιμοποιεί ένα παράθυρο 3X3 προκειμένου να υπολογίσει την κλίση, τα μαθηματικά την απλοποιούν ανάγοντας την στη χρήση τεσσάρων σημείων δεδομένου υψομέτρου, όπως επισημάνθηκε παραπάνω. Σύμφωνα με την σχέση υπολογισμού, η κλίση προκύπτει ως αδιάστατο μέγεθος (LU/LU), ενώ το αρνητικό πρόσημο υποδεικνύει ότι η κλίση είναι καθοδική.

Υπολογισμός της κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης (Aspect)

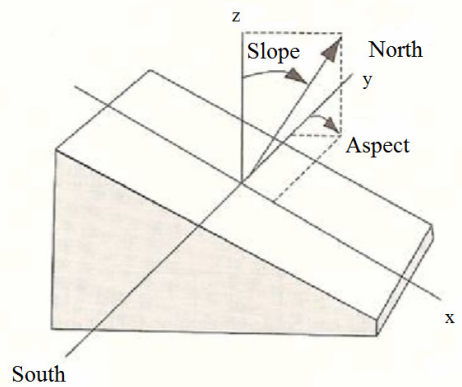
Η διεύθυνση κλίσης ορίζεται ως η κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης και μετριέται σε μοίρες (0°-360°), δεξιόστροφα, από την διεύθυνση του βορρά (**Εικόνα 9**). Βάσει της μεθόδου των Zevenbergen και Thorne η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης προσδιορίζεται σε κάθε φατνίο σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του. Αποτελεί ένδειξη της κατεύθυνσης της ροής του ύδατος και η γνώση της μεταβολής της σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής, παρέχει για κάθε σημείο της λεκάνης την πληροφορία που αφορά στη συγκέντρωση της ροής, που προέρχεται από την ανάντη περιοχή. Συνδυαστικά με την κλίση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και την αξιολόγηση της πιθανής εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων.

Η κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης, θ , υπολογίζεται από την παραγωγή της σχέσης (12) και την εύρεση της ελάχιστης τιμής της.

$$\frac{\partial Slope}{\partial \theta} = -G \sin \theta + H \cos \theta = 0 \quad (14)$$

$$\theta = \arctan(-H / -G) \quad (15)$$

Το πρόσημο του αριθμητή και του παρονομαστή της εξίσωσης (15) καθορίζει το τεταρτημόριο στο οποίο βρίσκεται η γωνία θ .

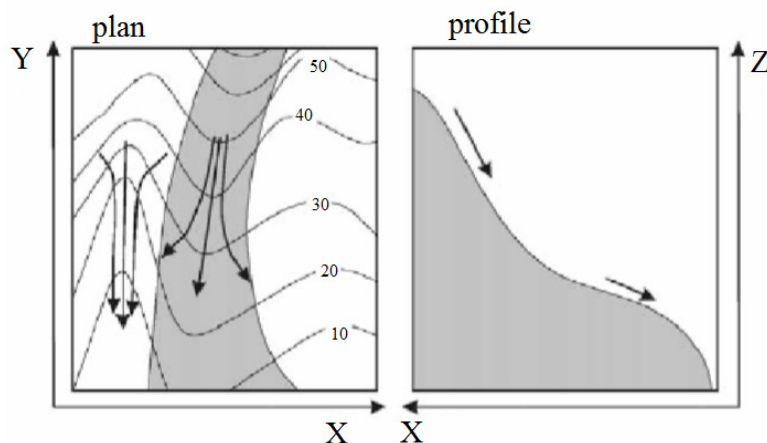


Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση των παραμέτρων της κλίσης και της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης

Πηγή: Chang, 1991

Υπολογισμός των καμπυλοτήτων (Plan & Profile Curvature)

Η καμπυλότητα αποτελεί την πρώτη παράγωγο της κλίσης, ή διαφορετικά την δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης του υψομέτρου και η μελέτη της συνίσταται σε δύο βασικές ορθογώνιες συνιστώσες, την καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature) και την καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης του πρανούς (profile curvature) (**Εικόνα 10**).



Εικόνα 10. Βασικές ορθογώνιες συνιστώσες της καμπυλότητας

Πηγή: Shary et al, 2002

Ειδικότερα, η καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature) αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται το αζιμούθιο κατά μήκος μιας γραμμής περιγράμματος, ενώ η καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης του πρανούς (profile curvature) αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής της κλίσης στο

κάθετο επίπεδο μιας γραμμής ροής. Δεδομένου ότι η καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature) υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του βαρυτικού δυναμικού, είναι χρήσιμη στην εύρεση αλλαγών της ταχύτητα ροής, καθώς και των διεργασιών μεταφοράς και εναπόθεσης ιζημάτων. Επιπλέον, οι τιμές της εν λόγω καμπυλότητας επιδρούν στην επιτάχυνση και επιβράδυνση της ροής και κατ' επέκταση επηρεάζουν την διαμόρφωση προσχώσεων στην γήινη επιφάνεια. Όσον αφορά, την καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της κλίσης (plan curvature) επισημαίνεται ότι μετρά την τοπογραφική σύγκλιση και απόκλιση και ως εκ τούτου δείχνει την τάση του νερού να συγκεντρώνεται κατά την ροή στην επιφάνεια του εδάφους (**Εικόνα 11**).

Γενικότερα, η καμπυλότητα προς κάθε κατεύθυνση φ , είναι η δεύτερη παράγωγος του υψομέτρου και προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

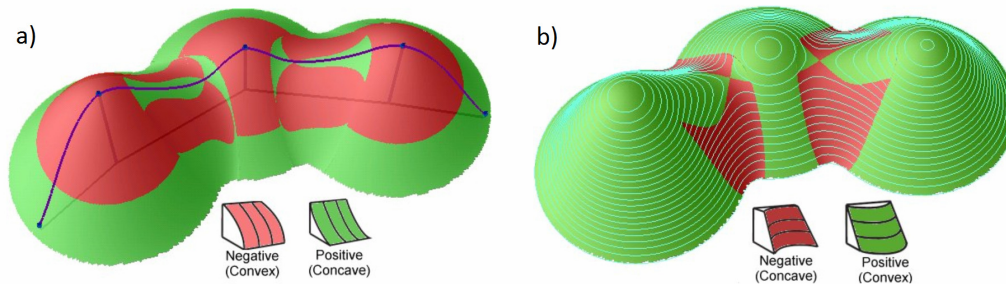
$$Curvature = \frac{\partial^2 Z}{\partial S^2} = 2(D \cos^2 \varphi + E \sin^2 \varphi + F \cos \varphi \sin \varphi) \quad (16)$$

Οι δύο κατευθύνσεις της καμπυλότητας, που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, είναι στην κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης ($\varphi=0$), δίνοντας την profile καμπυλότητα και στην εγκάρσια κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης ($\varphi=0+\pi/2$), παρέχοντας την plan καμπυλότητα.

$$\begin{aligned} PROFC &= -2(D \cos^2 \theta + E \sin^2 \theta + F \cos \theta \sin \theta) \\ &= -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2) \quad (17) \end{aligned}$$

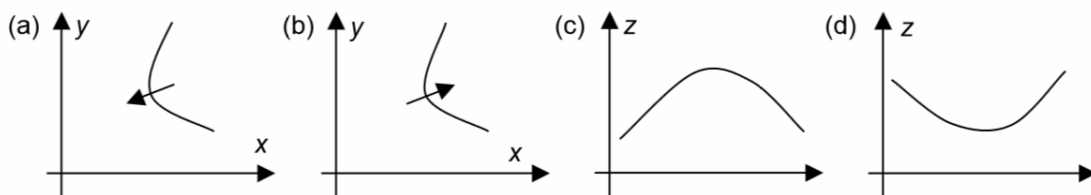
$$\begin{aligned} PLANC &= 2(D \sin^2 \theta + E \cos^2 \theta + F \sin \theta \cos \theta) \\ &= 2(DH^2 + EG^2 - FGH) / (G^2 + H^2) \quad (18) \end{aligned}$$

Οι τιμές των καμπυλοτήτων εκφράζονται σε διαστάσεις 1/LU. Θετικές τιμές της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature) υποδεικνύουν αύξηση της κλίσης, η οποία οδηγεί σε επιτάχυνση της ροής του ύδατος προς τα κατάντη σημεία, σε αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των ιζημάτων και σε μείωση της ευστάθειας των πρηνών. Ακόμη, οι θετικές τιμές της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature) υποδεικνύουν σύγκλιση των γραμμών ροής (δημιουργία βάλτων, ελών), και κατ' επέκταση συγκέντρωση της ροής του ύδατος και καθίζηση, ενώ οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν απόκλιση της ροής. Στην **Εικόνα 12** ερμηνεύονται οι τιμές των δύο συνιστωσών της καμπυλότητας, ως ένδειξη του μέτρου της κοιλότητας και κυρτότητας του εδάφους.



Εικόνα 11. a) καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature) b) καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature)

Πηγή: http://www.et-st.com/et_surface/userguide/Raster/ETG_RasterCurvature.htm, επισυνάφθηκε στις 15/07/2013



Εικόνα 12. Ερμηνεία των τιμών της plan (PLANC) και profile (PROFVC) καμπυλότητας a) θετική PLANC b) αρνητική PLANC c) θετική PROFVC d) αρνητική PROFVC

Πηγή: Li et al , 2005

Συσώρευση ροής (Catchment Area)

Η διαμόρφωση της τοπογραφίας στο φυσικό τοπίο έχει αντίκτυπο σε υδρολογικές, γεωμορφολογικές και βιολογικές δράσεις, που συντελούνται σε αυτό. Στο πλαίσιο μελέτης της γεωμορφολογίας, εντάσσεται και η αναπαράσταση του υδάτινου στοιχείου, στο περιβάλλον της υπό εξέταση περιοχής. Κατά την διάρκεια των τελευταίων είκοσι χρόνων, η διαθεσιμότητα δεδομένων υψηλής ακρίβειας, η χωρική ανάλυση, καθώς επίσης και η βελτίωση της ποιότητας των υδρολογικών εργαλείων μοντελοποίησης, έχουν οδηγήσει στην αυτόματη εξαγωγή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών από ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων. Το δίκτυο των ρεμάτων και τα σημεία έναρξής τους, έχουν κεντρική σημασία για την υδρολογία και γεωμορφολογία, διότι ελέγχουν και καθορίζουν πολλές περιβαλλοντικές παραμέτρους (π.χ. κλίμα, τοπογραφία, ιδιότητες του εδάφους). Εξάλλου, η απεικόνιση του υδάτινου στοιχείου αποτελεί την βάση για ένα ευρύ φάσμα ερευνών, που αφορούν την αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, τη ρύπανση του ποτάμιου συστήματος, τη διαχείριση των υδατικών πόρων κ.α.

➤ Αλγόριθμοι δρομολόγησης ροής του ύδατος

Γενικότερα, ο καθορισμός ενός δικτύου αποστράγγισης σε μια δεδομένη περιοχή προσδιορίζεται με την χρήση αλγορίθμων δρομολόγησης ροής, οι οποίοι έχουν προταθεί από διάφορους συγγραφείς και εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο σε υπό μορφή πλέγματος,

ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Συγκεντρωτικά, επισημαίνεται ότι, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης της ροής (Zhou & Liu, 2002):

- Προσομοιώνουν τη διανομή και τη ροή του ύδατος
- Αναγνωρίζουν τις συμβάλλουσες περιοχές στην απορροή και τις διαδρομές αποστράγγισης
- Διαμορφώνουν τις υδρολογικές διεργασίες (π.χ. χωρική κατανομή υγρασίας του εδάφους) με έναν απλουστευμένο, αλλά παράλληλα ρεαλιστικό τρόπο

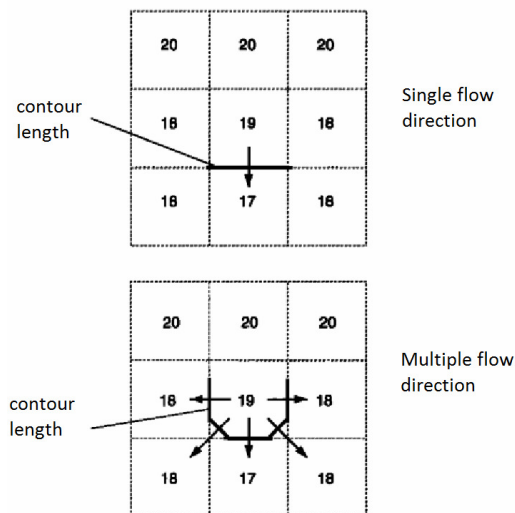
Αρχικά, σκόπιμο είναι να αναφερθεί ότι υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αλγορίθμων δρομολόγησης της ροής: Μονής κατεύθυνσης ροής (Single Flow Direction) και Πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Multiple Flow Direction) (**Εικόνα 13**). Η βασική ιδέα των αλγορίθμων μονής κατεύθυνσης ροής (όπως ο αλγόριθμος D8 που εφαρμόζεται στο ArcGIS) είναι ότι η ποσότητα του ύδατος ενός φατνίου θα πρέπει να εισρέει σε ένα και μόνο γειτονικό φατνίο, χαμηλότερου υψομέτρου. Αντιθέτως, οι αλγόριθμοι πολλαπλής κατεύθυνσης θεωρούν ότι η ροή από την τρέχουσα θέση αποστραγγίζεται σε περισσότερα του ενός, χαμηλότερου υψομέτρου, γειτονικά φατνία. Στην συνέχεια, παρατίθεται μια σύντομη συγκριτική ανάλυση των πέντε επικρατέστερων αλγορίθμων υδρολογικής μοντελοποίησης, με στόχο την επιλογή του καταλληλότερου για την παρούσα εργασία. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθορισμού ροής είναι ο αλγόριθμος D8 (deterministic eight node algorithm) (O'Callaghan & Mark, 1984), ο οποίος διέπεται από τις εξής αρχές: Κατά την εφαρμογή του σε ένα κινούμενο παράθυρο φατνίων 3X3, το νερό του κεντρικού φατνίου ρέει σε μία μόνο από τις 8 πιθανές κατευθύνσεις και επιπλέον, η κατεύθυνση αυτή εμφανίζει την υψηλότερη τιμή κλίσης. Επομένως, η κατεύθυνση της ροής περιορίζεται σε πολλαπλάσια των 45°, γεγονός που αποτελεί και την κύρια αιτία για πολλά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Ακόμη, ο αλγόριθμος έχει την τάση να δημιουργεί παράλληλες γραμμές ροής, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αδυναμία στην μοντελοποίηση της σύγκλισης της ροής σε περιοχές όπου επικρατούν μη γραμμικές συνθήκες ροής (επιφανειακή και υπεδάφια ροή). Γενικότερα, την υψηλότερη ακρίβεια προσδιορισμού της ροής εμφανίζει ο αλγόριθμος DEMON (Digital Elevation Model Network) (Cabral & Burgess, 1994), ο οποίος δέχεται την ελάχιστη επίδραση από τη δομή του καννάβου και αποδίδει τα ελάχιστα σφάλματα στην κατάντη ροή. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή του είναι αρκετά πολύπλοκη και η ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων ιδιαίτερος χαμηλή. Αντιθέτως, οι αλγόριθμοι D8, FD8 (Multiple flow direction) (Quinn et al, 1991), Rho8 (Fairfield & Leymarie 1991) και Deterministic Infinity (D ∞) (Tarboton, 1997) παρουσιάζουν απλούστερες δομές, διότι επιτρέπουν την αναδρομική εφαρμογή του αλγορίθμου, παρέχοντας άμεση αποτελεσματικότητα. Οι αλγόριθμοι D ∞ και FD8 αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο ο αλγόριθμος D ∞ εμφανίζει αδυναμία στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ασάφειας, στον καθορισμό της ροής. Ο αλγόριθμος D8 παρότι έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται πολύπλοκα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, επηρεάζεται από τη δομή του καννάβου, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σημαντικά υπολογιστικά λάθη. Ο αλγόριθμος Rho8, δεδομένου ότι εμπλέκει το στοιχείο της τυχαιότητας κατά τον υπολογισμό της κατεύθυνσης της ροής, δεν ερμηνεύει με ορθό τρόπο τη μορφολογία της δεδομένης

επιφάνειας. Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι οι DEMON, FD8, D_{∞} παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ οι D8 και Rho8 δημιουργούν στρεβλωμένη αναπαράσταση της πραγματικότητας. Ακόμη, όσον αφορά τη χωρική κατανομή, οι τρεις πρώτοι αλγόριθμοι (DEMON, FD8 & D_{∞}) είναι ικανοποιητικοί, για περιοχές με έντονες κλίσεις, διότι παρέχουν λογικά αποτελέσματα με τα ελάχιστα σφάλματα.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση, τίθενται τα εξής κριτήρια επιλογής του αλγορίθμου δρομολόγησης ροής:

- Αποφυγή της επίδρασης της επιλεγμένης δομής των δεδομένων
- Υψηλή ακρίβεια κατά την εκτέλεση της διαδικασίας
- Παραγωγή ελάχιστων σφαλμάτων κατά την περιγραφή της κατεύθυνσης ροής
- Αποτελεσματικότητα, η οποία συνίσταται στην ακρίβεια και ολοκλήρωση της εκτέλεσης του αλγορίθμου σε σύντομο χρόνο
- Αξιοπιστία στην αναπαράσταση των υφιστάμενων γεωμορφών και υδρολογικών συνθηκών

Συνεπώς, επιλέχθηκε η μέθοδος πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (FD8), με σκοπό να αποδοθεί με ένα ρεαλιστικό πρότυπο, η συσσώρευση της ροής του ύδατος στην εξεταζόμενη περιοχή.



Εικόνα 13. Αλγόριθμοι μονής και πολλαπλής κατεύθυνσης ροής

Πηγή: Wolock & McGabe, 1995

➤ Περιγραφή της μεθόδου Multiple Flow Direction (FD8 algorithm)

Ο αλγόριθμος πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Quinn et al, 1991) περιγράφει την κατεύθυνση της ροής, από ψηφιακά δεδομένα αναγλύφου σε ψηφιδωτή μορφή (raster), και βασίζεται στην λογική του μαθηματικού μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής, TOPMODEL (Beven et al., 1995). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κατανομημένη στο έδαφος υγρασία προβλέπεται βάσει ενός χωρικού δείκτη $\ln[\alpha/\tan(\beta)]$, όπου α είναι η έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής διαιρεμένη με το πλάτος ροής, κατά την έννοια

την κάθετη στη ροή, και $\tan(\beta)$ είναι η τοπική κλίση του εδάφους), που εκφράζει τον όγκο του νερού που έρχεται από την ανάντη συμβάλλουσα περιοχή, σε σχέση με την δυνατότητα παροχέτευσής του. Οι συγγραφείς της μεθόδου, χρησιμοποιώντας τον δείκτη αυτόν ως εργαλείο, προτείνουν η διανομή του νερού σε κάθε φατνίο να γίνεται προς όλες τις κατάντη διευθύνσεις. Οι διευθύνσεις αυτές διακρίνονται σε κάθετες και οριζόντιες, δημιουργώντας οχτώ πιθανές διανομές ροής, στο εξεταζόμενο φατνίο (**Εικόνα 13**). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολλαπλής κατεύθυνσης ροής και με δεδομένο εισόδου το διορθωμένο από βυθίσματα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, υπολογίζεται σε κάθε φατνίο, η έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα, για κάθε φατνίο i θεωρείται ότι υπάρχει νερό βάθους 1,0 m, επομένως ο όγκος του νερού θα είναι $V=1,0 \times A(i)$ σε m^3 , όπου $A(i)$ το εμβαδόν του φατνίου σε m^2 . Αν το συγκεκριμένο φατνίο i παρέχει στο γειτονικό του φατνίο j , το ποσοστό $c(i, j)$ του όγκου του, τότε στο κελί j , καταλήγει ένας όγκος νερού $V'=A(i) \cdot c(i, j)$, σε m^3 . Είναι προφανές ότι προχωρώντας προς τα κατάντη και αθροίζοντας όλες αυτές τις συμβολές, προκύπτει ο όγκος νερού σε κάθε φατνίο, ή πράγμα ισοδύναμο, η έκταση της ανάντη λεκάνης, εφόσον θεωρήθηκε μοναδιαίο βάθος νερού.

Δευτερεύοντα Τοπογραφικά Χαρακτηριστικά (Secondary or Compound Topographic Attributes)

Στα δευτερεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά υπάγονται καθορισμένοι δείκτες, οι οποίοι αποτελούν συνδυασμούς των πρωτεύοντων παραμέτρων του αναγλύφου. Κατά την διεξαγωγή της υφιστάμενης μελέτης, και επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τον στόχο αυτής καθώς και τα διαθέσιμα δεδομένα της περιοχής, επιλέχθηκε ο υπολογισμός των ακόλουθων δευτερευόντων χαρακτηριστικών: τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (topographic wetness index), δείκτης ροής ενέργειας (stream power index) και συντελεστής αναγλύφου (Length-Slope factor). Οι τρεις αυτοί δείκτες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των πολύπλοκων λειτουργιών του περιβάλλοντος, όπως είναι η ευαισθησία του τοπίου στην διάβρωση. Γενικά, μέσω του υπολογισμού των παραμέτρων αυτών προβάλλεται η συμπεριφορά του συστήματος απέναντι σε φυσικές διεργασίες, ενώ παράλληλα δημιουργείται το υπόβαθρο για μελλοντική πρόβλεψη των διαδικασιών, για υδρολογική παρακολούθηση μιας περιοχής μελέτης και για τον σχεδιασμό έργων γεωργικής και δασικής ανάπτυξης.

Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index)

Η έννοια του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας εισήχθη πρώτη φορά από τους Beven και Kirkby (1979) και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επίδραση της τοπογραφίας στις υδρολογικές διεργασίες, καθώς και την έκταση των ζωνών κορεσμού του εδάφους, που δημιουργούνται λόγω της απορροής. Για το σκοπό αυτό, ο προσδιορισμός του συγκεκριμένου δείκτη κρίθηκε σκόπιμος, καθώς αποτελεί ένδειξη της χωρικής κατανομής της υγρασίας (χωρική διανομή και στασιμότητα του νερού) για την περιοχή μελέτης. Δεδομένου ότι, ο δείκτης περιγράφει την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό εξαιτίας του κορεσμού της γήινης επιφάνειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην μελέτη

ύπαρξης υπόγειων υδάτων, ενώ παράλληλα μπορεί να αποτελέσει τη βάση σε εκτιμήσεις συστατικών του ύδατος (PH, συγκεντρώσεις ουσιών, βιολογικές εφαρμογές), καθώς και σε μελέτες κατανομής του πλούτου φυσικών ειδών. Ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας προτάθηκε στο πλαίσιο του υδρολογικού μοντέλου, TOPMODEL (Beven et al., 1995) και ο προσδιορισμός του σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους υπό μορφή πλέγματος, επιτυγχάνεται από την σχέση:

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right) \quad (19)$$

Όπου α είναι η ανάντη συμβάλλουσα περιοχή που αποστραγγίζεται στο συγκεκριμένο σημείο, ανά μονάδα μήκους (m^2/m), ενώ η παράμετρος β χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της υδραυλικής κλίσης (τοπικό δυναμικό αποστράγγισης) και είναι η τιμή της κλίσης σε μοίρες, στο εν λόγω σημείο. Στο σημείο αυτό, υπογραμμίζεται ότι οι τιμές των δύο παραμέτρων που εισάγονται στην παραπάνω σχέση εξαρτώνται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης ροής και την χωρική ανάλυση του χρησιμοποιούμενου πλέγματος.

Η τιμή του δείκτη υποδηλώνει την τάση του φατνίου στο να παράγει απορροή, καθώς περιοχές με υψηλό δείκτη υγρασίας είναι πιο επιρρεπείς στον κορεσμό. Επομένως, η χωρική κατανομή των τιμών του δείκτη υποδεικνύει το χωρικό πρότυπο της υγρασίας του εδάφους στην περιοχή. Τέλος, επισημαίνεται ότι έχει αποδειχθεί πως η χρήση αλγορίθμων πολλαπλής κατεύθυνσης, για τον υπολογισμό της απορροής, παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα στον προσδιορισμό του δείκτη υγρασίας.

Δείκτης Ροής Ενέργειας (Stream Power Index)

Ο δείκτης ροής ενέργειας δείχνει το ρυθμό που δαπανάται η ενέργεια κατά τη ροή των ρεμάτων και χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε έρευνες που αφορούν την διάβρωση, την μεταφορά ιζημάτων και την γεωμορφολογία. Για τον υπολογισμό του δείκτη εφαρμόστηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$SPI = \alpha \cdot \tan \beta \quad (20)$$

Όπου α είναι η έκταση της ανάντη συμβάλλουσας περιοχή που αποστραγγίζεται στο συγκεκριμένο σημείο, ανά μονάδα μήκους (m^2/m) και β είναι η τιμή της κλίσης σε μοίρες, στο σημείο αυτό.

Ο δείκτης ροής ενέργειας, ως μέτρο της διαβρωτικής δύναμης του ρέοντος ύδατος, αποτελεί το μέσο για την πρόβλεψη της εναπόθεσης υλικού, σε ζώνες μειωμένης ταχύτητας ροής, καθώς και της διάβρωσης ενός δικτύου, σε περιοχές όπου παρατηρείται επιτάχυνση της ροής ή σε ζώνες σύγκλισης.

Συντελεστής αναγλύφου LS (Length - Slope Factor)

Ο συντελεστής αναγλύφου αποτελείται από δύο παράγοντες, το μήκος L (Length Factor) και την κλίση S (Slope Factor). Ο παράγοντας L αντιπροσωπεύει την επίδραση του μήκους της κλίσης, στην διάβρωση. Ο παράγοντας S υποδεικνύει την επίδραση του βαθμού της κλίσης, στη διάβρωση. Πιο συγκεκριμένα, ο παράγοντας L είναι ο λόγος της απώλειας του εδάφους (soil loss) σε ένα μήκος κλίσης του πεδίου, προς την απώλεια του εδάφους από ένα μήκος 72,6 ποδών (22,13 m), για τον ίδιο τύπο εδάφους και με όμοια κλίση (Rodriguez & Suarez, 2010). Προσδιορίζεται καλύτερα με μετρήσεις στο πεδίο, όπου μετριέται κάθετα στις ισοϋψείς καμπύλες, από το σημείο προέλευσης της επιφανειακής απορροής, έως εκείνο το σημείο όπου ξεκινά η εναπόθεση του ιζήματος, είτε η απορροή εισέρχεται σε ένα καλά καθορισμένο κανάλι. Αντιθέτως, ο παράγοντας S είναι ο λόγος της απώλειας του εδάφους από την κλίση του πεδίου προς την απώλεια εδάφους σε μία κλίση 9%, υπό όμοιες συνθήκες. Όπως είναι αναμενόμενο, η εδαφική απώλεια αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό όταν ο βαθμός της κλίσης είναι πιο απότομος, ενισχύοντας την διαδικασία της διάβρωσης. Ωστόσο, η σχέση της απώλειας εδάφους με την κλίση επηρεάζεται από την πυκνότητα της φυτοκάλυψης και το μέγεθος των σωματιδίων του εδάφους. Γενικότερα, ο συντελεστής αναγλύφου είναι μία από τις παραμέτρους που εισάγονται στην παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Universal Soil Loss Equation) και οι τιμές του παρουσιάζουν το πώς διανέμεται χωρικά η ικανότητα μεταφοράς του ιζήματος και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση και πρόβλεψη της διάβρωσης. Η τιμή του συντελεστή αναγλύφου LS είναι ίση με 1 για μήκος κλίσης 72,6 ποδών και βαθμό κλίσης 9%. Ο προσδιορισμός του εν λόγω συντελεστή, σε κάθε σημείο του εκάστοτε ψηφιακού μοντέλου, επιτεύχθηκε μέσω της σχέσης (Moore et al, 1991):

$$LS = (n+1)\left(\frac{\alpha}{22,13}\right)^n \left(\frac{\sin \beta}{\sin 5,143^\circ}\right)^m \quad (21)$$

Όπου α είναι η ανάντη συμβάλλουσα περιοχή αποστράγγισης, ανά μονάδα πλάτους (m²/m), β είναι η γωνία κλίσης σε μοίρες, 22,13 m (72,6ft) και 0,09 (9% ή διαφορετικά 5,143°) είναι το μήκος και η κλίση της πρότυπης εξίσωσης εδαφικής απώλειας, αντίστοιχα. Οι παράμετροι m, n ορίζονται από το λογισμικό του προγράμματος, διαφορετικά θα πρέπει να προκύπτουν από την βαθμονόμηση των διαθέσιμων δεδομένων για το είδος ροής και τις εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

3.3.2. Χαρακτηριστικά υδρολογικού ενδιαφέροντος

Το τρεχούμενο νερό της γήινης επιφάνειας αποτελεί τον σπουδαιότερο παράγοντα διαμόρφωσης του επιφανειακού αναγλύφου και η δράση του στο έδαφος διαμορφώνει σαφή υδάτινα σώματα, όπως είναι τα σχηματιζόμενα υδατορεύματα (υδρογραφικό δίκτυο). Στην συνέχεια, παρατίθεται οι ορισμοί των υπολογισθέντων υδρογραφικών δεικτών και παραμέτρων, οι οποίοι αποτυπώνουν το γεωμορφολογικό προφίλ της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

Λεκάνη απορροής

Ως λεκάνη απορροής ορίζεται: «Η λεκάνη απορροής σε συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος, ονομάζεται η γεωγραφική περιοχή που συνεισφέρει στην απορροή του υδατορεύματος που διέρχεται από την δεδομένη διατομή» (Τσακίρης & Βαγγέλης, 2009, σελ.7). Η λεκάνη απορροής οριοθετείται μέσω του υδροκρίτη της, που αποτελεί το τοπογραφικό της όριο και διαχωρίζει τη ροή των όμβριων υδάτων. Ουσιαστικά, η λεκάνη απορροής αποτελεί ένα σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε υδρογραφήματα απορροής (άμεση¹ και βασική² απορροή) και χαρακτηρίζεται από τα φυσιογραφικά της γνωρίσματα, τα οποία επηρεάζουν την διαδικασία του μετασχηματισμού. Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης διακρίνονται σε μορφολογικά (μορφή, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο), σε εδαφολογικά (είδος εδαφών, χημική σύσταση και ιδιότητες εδάφους) και σε αυτά που αφορούν τις χρήσεις γης και την φυτοκάλυψη (είδη χλωρίδας, αστική χρήση, κ.τ.λ.). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, μελετάται η επίδραση που επιφέρει η επιλογή της χωρικής ανάλυσης του ΨΜΥ στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης λεκάνης απορροής.

Γεωμετρία της λεκάνης απορροής

Η έκταση που καλύπτει η σχηματιζόμενη λεκάνη απορροής αποτελεί μια σημαντική παράμετρο υπολογισμού, καθώς επηρεάζει, την συνολική απορροή στο σημείο εξόδου της λεκάνης και επιπλέον, το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής. Η εκτίμηση της έκτασης της λεκάνης απορροής πραγματοποιείται με καθορισμό του επιφανειακού υδροκρίτη της (υδροκριτική γραμμή), εκατέρωθεν του οποίου τα επιφανειακά νερά κατευθύνονται προς διαφορετικές λεκάνες. Στο σημείο αυτό, υπογραμμίζεται ότι η απορροή του υδατορεύματος δημιουργείται όχι μόνο από την επιφανειακή απορροή, αλλά και από την υπεδάφια/υπόγεια απορροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο επιφανειακός υδροκρίτης να μην συμπίπτει πάντοτε με τον υπόγειο, λόγω διαφοράς υψομέτρου ή λόγω της διάταξης των γεωλογικών σχηματισμών (Τσακίρης, 1995). Ωστόσο στην υφιστάμενη μελέτη, η έκταση της λεκάνης απορροής προσδιορίζεται μέσω του τοπογραφικού ορίου της (επιφανειακός υδροκρίτης), διότι ο καθορισμός του υπόγειου υδροκρίτη θα απαιτούσε περαιτέρω διερεύνηση της περιοχής, κάτι το οποίο είναι πρακτικά ανέφικτο.

Ανάγλυφο της λεκάνης απορροής

Τα υψόμετρα και οι κλίσεις που εντοπίζονται στην περιοχή της λεκάνης απορροής, διαμορφώνουν το ανάγλυφό της και επηρεάζουν τις διεργασίες βροχής-απορροής, που συντελούνται στην επιφάνειά της. Οι επικρατούσες θερμοκρασίες, καθώς και τα κατακρημνίσματα στην λεκάνη, σχετίζονται άμεσα με τα υψόμετρα της. Χαρακτηριστικά

¹ Απορροή που καταλήγει στα υδατορεύματα αμέσως μετά την βροχόπτωση ή την τήξη χιονιού και αποτελείται κυρίως από την επιφανειακή και μέρος της υπεδάφιας ροής.

² Αποτελείται κυρίως από την υπόγεια απορροή.

αναφέρεται ότι η αύξηση του υψομέτρου οδηγεί στην αύξηση των κατακρημνισμάτων μέχρι το υψόμετρο των 2,5 km (περαιτέρω αύξηση του υψομέτρου, δημιουργεί ελάττωση κατακρημνισμάτων), αλλά παράλληλα στην μείωση της θερμοκρασίας. Η συσχέτιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον επηρεασμό της απορροής, διότι μεγαλύτερο ύψος κατακρημνισμάτων συντελεί στην αύξηση της απορροής ενώ χαμηλότερες ή υψηλότερες θερμοκρασίες συνεπάγονται ελάττωση ή αύξηση της εξάτμισης αντίστοιχα (Τσακίρης, 1995). Όσον αφορά την κλίση σημειώνεται ότι σε περιπτώσεις ομαλού αναγλύφου, με μικρές ή μέτριες κλίσεις προκύπτουν αντίστοιχα μεγάλος ή μέτριος χρόνος συγκέντρωσης του περισεύματος βροχής. Αντιθέτως, η ύπαρξη μεγάλων κλίσεων και παράλληλα ομαλού εδάφους στην λεκάνη, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μικρός χρόνος συγκέντρωσης του περισεύματος βροχής (χρόνος συρροής) και συνεπώς η πιθανότητα διήθησης μειώνεται και η αύξηση μεταφοράς φερτών αυξάνεται. Στην υφιστάμενη μελέτη προσδιορίστηκε το μέγιστο, το ελάχιστο, το μέσο υψόμετρο και η διάμεσος των υψομέτρων της λεκάνης. Ειδικότερα, η κατανομή των υψομέτρων στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, προκύπτει από την χάραξη της υψομετρικής, ή διαφορετικά υψογραφικής καμπύλης. Η καμπύλη αυτή χαράσσεται σε σύστημα συντεταγμένων, και αντιστοιχίζει κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψομέτρου, στο ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής. Η μορφή της υψογραφικής καμπύλης αποκαλύπτει αρκετά χαρακτηριστικά του αναγλύφου της λεκάνης με αποτέλεσμα να προκύπτουν ποιοτικά συμπεράσματα για την αναμενόμενη μορφή των πλημμυρογραφημάτων και τους χαρακτηριστικούς χρόνους τους (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Από τα χαρακτηριστικά υψόμετρα της λεκάνης το μέσο υψόμετρο ορίζεται ως εξής:

«Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι το θεωρητικό απόλυτο υψόμετρο που θα είχε η περιοχή της λεκάνης μετά την εξομάλυνση όλων των μορφολογικών ανωμαλιών και την δημιουργία μιας ενιαίας οριζόντιας επιφάνειας»

(Πηγή:https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDYQFjAC&url=http%3A%2F%2Fusers.uoa.gr%2F~eandreadk%2Findex_files%2FHydrogeology01.pps&ei=dKnwUsjyG8mQtQbWr4Bw&usq=AFQjCNHmCff7ROiBhkNIH6bufnTRkNEaMA,

επιστημάνθηκε στις 10/11/13).

Ο προσδιορισμός του μέσου υψομέτρου της λεκάνης είναι αναγκαίος καθώς σε συνδυασμό με την βροχοβαθμίδα³ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του όγκου των βροχοπτώσεων που απορρίπτονται στην περιοχή της λεκάνης. Το μέσο υψόμετρο υπολογίζεται με χρήση της παρακάτω σχέσης, η εφαρμογή της οποίας προϋποθέτει διαίρεση της λεκάνης σε υποπεριοχές - ζώνες της λεκάνης μεταξύ δύο χωροσταθμικών καμπύλων- και προσδιορισμού του μέσου όρου του υψομέτρου για κάθε μία από αυτές.

³ Μεταβολή ύψους βροχής ανά μονάδα μεταβολής του υψομέτρου (mm/m).

$$Z_m = \frac{\sum (Z_i A_i)}{\sum A_i} \quad (22)$$

Όπου: Z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
 Z_i : μέσο υψόμετρο κάθε υποπεριοχής
 A_i : το εμβαδόν κάθε υποπεριοχής

Η σχέση προσδιορισμού του μέσου υψομέτρου ταυτίζεται με την μέση τιμή των υψομέτρων των φατνίων που απαρτίζουν την λεκάνη απορροής, αν θεωρηθεί ότι το εμβαδό κάθε υποπεριοχής αναφέρεται στην επιφάνεια που καλύπτει το κάθε φατνίο. Τέλος, όσον αφορά την παράμετρο της κλίσης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μέσης κλίσης της επιφάνειας της λεκάνης και η σχέση που εφαρμόζεται είναι η ακόλουθη:

$$S_g = \frac{D \sum_u^k L_n}{A} \quad (23)$$

Όπου: S_g : η μέση κλίση της λεκάνης
 L_n : μήκος ισοΰψους καμπύλης
 A : το εμβαδόν της λεκάνης απορροής
 D : ισοδιάσταση χωροσταθμικών καμπύλων
 u : ελάχιστη τιμή ισοΰψους καμπύλης
 k : μέγιστη τιμή ισοΰψους καμπύλης

Η μέση κλίση σχετίζεται με συντελεστές υδρολογικού ενδιαφέροντος όπως είναι ο συντελεστής απορροής⁴ και ο συντελεστής κατεϊσδυσης⁵. Ειδικότερα, αύξηση της μορφολογικής κλίσης προκαλεί αύξηση του συντελεστή απορροής και μείωση της μέσης κλίσης επιφέρει αύξηση του συντελεστή κατεϊσδυσης.

Ανάλυση συχνότητας υψομέτρων και κλίσεων της λεκάνης απορροής

Για την ανάλυση της συχνότητας της παραμέτρου της κλίσης στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, σχεδιάστηκαν οι κατανομές πιθανότητας υπέρβασης, θεωρώντας τις τιμές των δεδομένων τυχαίες και μελετώντας τις ως διακεκριμένες στατιστικές μεταβλητές. Βάσει της θεωρίας των διακριτοποιημένων κατανομών, η πιθανότητα εμφάνισης μιας τιμής x_i , με συχνότητα εμφάνισης N_i και άθροισμα των συχνοτήτων εμφάνισης N , για την στατιστική μεταβλητή x , δίνεται από την σχέση:

$$p(x_i) = \frac{N_i}{N}$$

⁴ Εκφράζει τον λόγο της άμεσης απορροής προς τον όγκο της βροχόπτωσης.

⁵ Εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεϊσδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης οι τιμές των κλίσεων σε ποσοστό της εκατό κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά και εφαρμόζεται η σχέση Weibull (1939), για τον υπολογισμό της πιθανότητας μη υπέρβασης για κάθε στοιχείο της σειράς των δεδομένων. Η πιθανότητα υπέρβασης ορίζεται από την σχέση:

$$p(X \geq x) = \frac{m}{N+1} \quad (\text{Weibull, 1939}), \quad (24)$$

Όπου N: ο αριθμός των παρατηρήσεων

m: η σειρά του μεγέθους στην φθίνουσα κατάταξη

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αναδειχθεί η στατιστική κατανομή των κλίσεων για όλη την επιφάνεια που καλύπτει η λεκάνη απορροής.

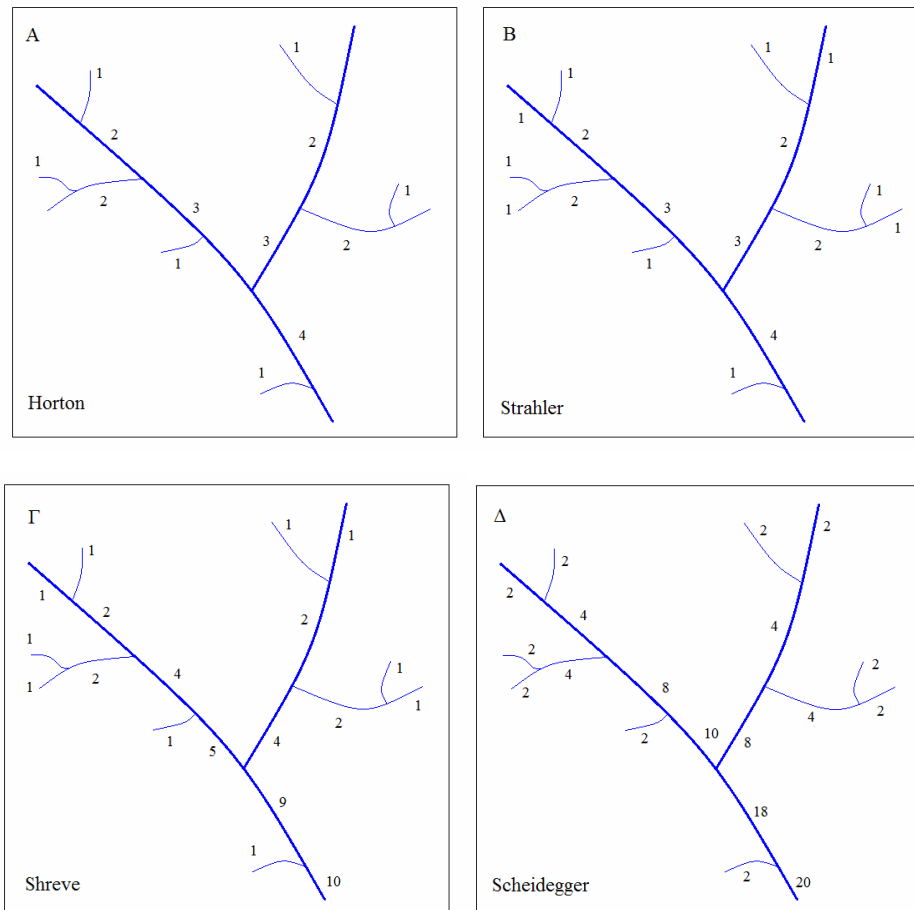
Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο αφορά στις διαδρομές αποστράγγισης του επιφανειακού ύδατος, το οποίο προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, τις πηγές, την τήξη των πάγων κ.α., που εντοπίζονται στην περιοχή της λεκάνης. Σε γενικές γραμμές, η ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου δεν αποσκοπεί μονάχα στην έκφραση των χαρακτηριστικών της δομής του, αλλά και στον προσδιορισμό της επίπτωσης των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο ποτάμιο σύστημα. Επιπλέον, το υδρογραφικό δίκτυο καθορίζει την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής και η μελέτη του αποδίδει σημαντικές πληροφορίες για την μελλοντική εξέλιξή της.

Κατάταξη υδατορευμάτων σε τάξεις

Η κατάταξη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου σε ιεραρχημένες τάξεις, πραγματοποιείται ανάλογα με το μήκος τους, την έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής, την μέση ετήσια παροχή και άλλα στοιχεία. Η αριθμηση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου γίνεται κυρίως με τέσσερις μεθόδους: κατά Horton, Strahler, Scheidegger & Shreve. Στην μέθοδο κατά Horton, ο κλάδος, ο οποίος δεν έχει άλλους συμβάλλοντες, χαρακτηρίζεται ως ρεύμα πρώτης τάξης. Η συμβολή δύο ρευμάτων σχηματίζει ρεύμα δεύτερης τάξης, η ένωση δύο δεύτερης αποδίδει ρεύμα τρίτης τάξης, κ.ο.κ. Η μέθοδος κατά Strahler, αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου Horton, και σύμφωνα με την κατάταξη αυτή, οι κλάδοι οι οποίοι δεν δέχονται τα ύδατα μικρότερων κλάδων χαρακτηρίζονται ως πρώτης τάξης. Η ένωση δύο κλάδων πρώτης, σχηματίζει ένα ρεύμα δεύτερης, και ομοίως η σύνδεση δύο δεύτερης σχηματίζει τρίτης τάξεως ρεύμα, κ.ο.κ. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι κατά την σύνδεση κλάδων διαφορετικής τάξεως, διατηρείται η τάξη του μεγαλύτερου ρεύματος. Στην υφιστάμενη εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος Strahler, η οποία ερμηνεύει τους νόμους υδρογραφικής σύνθεσης κατά Horton, που αναλύονται παρακάτω. Ωστόσο, για την πληρότητα του ζητήματος που θίγεται, αναφέρονται και οι μέθοδοι, του Shreve και του Scheidegger. Στην μέθοδο Scheidegger, οι μικρότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου χαρακτηρίζονται ως ρέματα δεύτερης τάξης, ενώ η σύνδεση δύο κλάδων ανεξάρτητης τάξης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός

ρεύματος με τάξη ίση με το άθροισμα των συμβαλλόμενων κλάδων. Τέλος, επισημαίνεται ότι η μέθοδος του Shreve ακολουθεί το πρότυπο του Scheidegger, με την διαφορά ότι οι κλάδοι δεύτερης τάξης του Scheidegger χαρακτηρίζονται ως πρώτης. Επιπροσθέτως, η αναφορά στους κλάδους γίνεται βάσει του μεγέθους σύνδεσης και όχι της τάξης του ρεύματος. Στην **Εικόνα 14** διασαφηνίζονται οι μέθοδοι κατάταξης που περιγράφηκαν ανωτέρω.



Εικόνα 14. Μέθοδοι κατάταξης των ρευμάτων σε τάξεις ιεράρχησης

Νόμοι υδρογραφικής σύνθεσης κατά Horton

Οι νόμοι υδρογραφικής σύνθεσης αναφέρονται σε ορισμένες αρχές που προτάθηκαν από τον Horton, ο οποίος υποστήριξε πως η ανάπτυξη κάθε υδρογραφικού δικτύου υπάγεται σε ορισμένους φυσικούς νόμους. Οι νόμοι αυτοί εφαρμόζονται σε ένα μοντέλο υδρογραφικού δικτύου, το οποίο αναπτύσσεται τέλεια σε ένα ισότροπο μέσο, χωρίς να υφίσταται την επίδραση της τεκτονικής. Επομένως, μία πιθανή περίπτωση απόκλισης μεταξύ των δύο νόμων είναι η επίδραση της τεκτονικής, η οποία επιφέρει κατακερματισμό των μητρικών πετρωμάτων και κατ' επέκταση προκαλεί αύξηση του μέσου μήκους των ρευμάτων.

1ος Νόμος κατά Horton

Ο 1^{ος} νόμος του Horton αναφέρεται στις διαδοχικές τάξεις κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου και διατυπώνεται ως εξής:

«Ο αριθμός των διαδοχικά μικρότερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνει να σχηματίζει μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι η μονάδα και λόγος της είναι ο λόγος διακλάδωσης (R_B)» (Scheidegger, 1968, p. 655).

Ουσιαστικά, η παρατήρηση του Horton περιγράφει ότι όσο η τάξη των ρεμάτων μεγαλώνει, τόσο ο αριθμός τους μικραίνει. Ο συγκεκριμένος νόμος εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$N_u = R_B^{K-u}$$

Όπου: N_u : ο αριθμός των κλάδων της u τάξης

R_B : ο λόγος διακλάδωσης

K : η μέγιστη παρατηρούμενη τάξη του υδρογραφικού δικτύου

u : η ζητούμενη τάξη

Ο λόγος διακλάδωσης υποδεικνύει την γεωμετρική σχέση ανάμεσα στον αριθμό των ρεμάτων μιας τάξης και στον αριθμό των ρεμάτων της αμέσως επόμενης μεγαλύτερης τάξης. Η παράμετρος αυτή προσδιόρισε εμπειρικά από τον Horton και δίνεται από την σχέση:

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (25)$$

Όπου: N_i : ο αριθμός των κλάδων της i τάξης

N_{i+1} : ο αριθμός των κλάδων της $i+1$ τάξης

R_B : ο λόγος διακλάδωσης

Η θεωρητικά ελάχιστη τιμή του λόγου είναι 2, ενώ τυπικά οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 3 έως 5 (Ven Te Chow, 1988). Οι τιμές του λόγου διακλάδωσης αντανακλούν την μορφολογία της λεκάνης απορροής (επίπεδες, ομαλές ή απότομες κλίσεις) (Kuroki et al., 2007). Σύμφωνα με τον Horton, ο λόγος διακλάδωσης έχει σχετικά χαμηλή τιμή σε επίπεδες περιοχές, ενώ υψηλή τιμή του λόγου υποδηλώνει πιο ορεινό ανάγλυφο. Ακόμη, επισημαίνεται ότι υψηλές τιμές του δείκτη σχετίζονται με επιμήκεις λεκάνες απορροής, ενώ χαμηλές τιμές του λόγου διακλάδωσης σχετίζονται με πιο κυκλικού σχήματος λεκάνες, ενώ παράλληλα υποδηλώνουν υψηλή πιθανότητα πλημμύρας.

2ος Νόμος κατά Horton

Ο 2^{ος} νόμος κατά Horton συνδέει την σχέση του μέσου μήκους των ρεμάτων κάθε τάξης με το μέσο μήκος των ρεμάτων της αμέσως επόμενης μεγαλύτερης τάξης και διατυπώνεται ως εξής:

«Τα μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, σχηματίζουν μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης και ο λόγος της είναι ο λόγος του μήκους (R_L)» (Scheidegger, 1968, p. 655).

Την μαθηματική έκφραση του νόμου αποτελεί η ακόλουθη σχέση:

$$\sum \bar{L}_u = \bar{L}_1 R_L^{u-1}$$

Όπου: $\sum \bar{L}_u$: το άθροισμα του μέσου μήκους των κλάδων της u τάξης

R_L : ο λόγος του μήκους

L_1 : το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης

u: η ζητούμενη τάξη

Και έτσι ο λόγος του μήκους κατά Horton, ορίζεται από τη σχέση:

$$R_L = \frac{L_{i+1}}{L_i} \quad (26)$$

Όπου: L_i : το μέσο μήκος των ρεμάτων της i τάξης

L_{i+1} : το μέσο μήκος των ρεμάτων της i+1 τάξης

R_L : ο λόγος του μήκους

Πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και μέσο μήκος επιφανειακής απορροής

Δύο ακόμα χρήσιμες παράμετροι για την υδρολογική ανάλυση είναι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και το μέσο μήκος της επιφανειακής απορροής (Ven Te Chow, 1988). Η πυκνότητα αποστράγγισης ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου, προς την επιφάνεια της λεκάνης. Γενικότερα, λεκάνες με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, δημιουργούν υψηλές πλημμυρικές αιχμές στο σημείο εξόδου, ενώ παράλληλα δημιουργούνται συνθήκες που ενισχύουν την διάβρωση, μεταφορά και εναπόθεση φερτών υλικών, που αποσπώνται από τα μητρικά πετρώματα. Οι ακόλουθες σχέσεις προβάλλουν τον τρόπο υπολογισμού των εν λόγω παραμέτρων:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{N_i} L_{ij}}{A} \quad (27)$$

Όπου: L_{ij} : το μήκος του j ρέματος της τάξης i

A : είναι η έκταση της λεκάνης απορροής

D_d : η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου [m^{-1}]

$$L_0 = \frac{1}{2D_d} \quad (28)$$

Όπου: L_0 : το μέσο μήκος της επιφανειακής απορροής ή διαφορετικά η μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα

D_d : η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου

Γεωμετρία κύριου υδατορεύματος

Ως κύριο υδατόρευμα ή κύρια μισγάγγεια της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζεται μια συγκεκριμένη διαδρομή κατά μήκος του υδατορεύματος (συνήθως αναφέρεται στον κλάδο μεγαλύτερου μήκους), η οποία καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης. Αναφορικά με την γεωμετρία του κύριου υδατορεύματος σημειώνεται ότι προσδιορίστηκε το συνολικό μήκος του, το οποίο αποτελεί ένα από τα κυριότερα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και συσχετίζεται εμπειρικά με τον χρόνο συγκέντρωσης, που αναλύεται παρακάτω. Ο κλάδος του κύριου υδατορεύματος, που αναφέρεται στον ποταμό Madden, ορίστηκε βάσει συγκεκριμένων αρχών. Ειδικότερα, το κύριο υδατόρευμα αποτελεί τον κύριο κλάδο της λεκάνης, είναι μοναδικό και δεν έχει διακλαδώσεις. Επιπλέον, ο καθορισμός του στην παρούσα μελέτη προκύπτει από την συνένωση όλων των τμημάτων του υδατορεύματος έως και τέσσερις τάξεις του υδρογραφικού δικτύου, στα οποία στον κατάντη κόμβο συμβολής τους αντιστοιχεί πάντα η μεγαλύτερη σε έκταση ανάντη λεκάνη απορροής. Τέλος, επισημαίνεται ότι η διαμορφωμένη διαδρομή του κύριου ρεύματος μπορεί να καθορίζεται από μεγέθη που αφορούν την απορροή, την ποσότητα και τις ιδιότητες των φερτών, την σύνθεση των πετρωμάτων του πυθμένα και των πρανών, καθώς και τα χαρακτηριστικά κατά μήκος της κοίτης.

Χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής

Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι μία έννοια που χρησιμοποιείται στην υδρολογία για να περιγράψει την απόκριση μιας λεκάνης απορροής σε ένα γεγονός βροχής και κατατάσσεται στην κατηγορία των υδραυλικών χαρακτηριστικών της. Ειδικότερα, ο χρόνος συγκέντρωσης μιας λεκάνης απορροής εκφράζει την χρονική καθυστέρηση, με την οποία εμφανίζεται η αιχμή της παροχής απορροής, σε σχέση με τον χρόνο που άρχισε η βροχή στην λεκάνη. Ο υπολογισμός του προκύπτει από την ανάλυση ζευγών υετογραμμάτων ή υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης, ωστόσο στην περίπτωση έλλειψης μετρήσεων μπορεί να εκτιμηθεί από εμπειρικές σχέσεις, όπως είναι η σχέση του Kirpich ή η σχέση Giandotti. Γενικότερα, ο προσδιορισμός του χρόνου γίνεται με βάση την διαδρομή που ακολουθεί το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης έως την έξοδο. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ο χρόνος συγκέντρωσης είναι συνάρτηση της τοπογραφίας, γεωλογίας καθώς και των υφιστάμενων χρήσεων γης στην περιοχή της

λεκάνης απορροής. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η σχέση Giandotti, για την εκτίμηση του εν λόγω υδρολογικού μεγέθους:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{\Delta H}} \quad (29)$$

Όπου: L: η απόσταση κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος μέχρι την έξοδο της λεκάνης, km

A: είναι η έκταση της λεκάνης απορροής, km²

ΔH: η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψομέτρου της λεκάνης και της κοίτης του ρεύματος στην έξοδο της λεκάνης, m

t_c: χρόνος συγκέντρωσης, hours

Γενικότερα, ο χρόνος συγκέντρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του ρυθμού απορροής, κατά την εκδήλωση ενός υποθετικού φαινομένου, λαμβάνοντας υπόψη την στατιστική ανάλυση για συγκεκριμένη, περίοδο επαναφοράς. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το αντικείμενο των μηχανικών, καθώς συνδέεται με την ανάπτυξη και διαχείριση έργων υποδομής ή την εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω, με στόχο να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η χωρική ανάλυση σε μοντέλα, τα οποία ποσοτικοποιούν και περιγράφουν τα χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής. Γενικότερα, στο επίκεντρο της υφιστάμενης μελέτης τίθεται το ερώτημα «Πως και γιατί η χωρική ανάλυση επηρεάζει τα υπολογιζόμενα τοπογραφικά χαρακτηριστικά;». Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται τα παράγωγα ψηφιακά μοντέλα χωρικών αναλύσεων 5 m, 10 m, 25 m και 50 m με ένα πρωτογενές ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης 1 m, ως προς τα γεωμορφομετρικά και υδρογραφικά χαρακτηριστικά. Η επιλογή του μοντέλου ανάλυσης 1m, ως μοντέλου αναφοράς, πραγματοποιήθηκε καθώς στην υψηλότερη χωρική ανάλυση επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος βαθμός λεπτομέρειας, και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.

4.1. Λογισμικά Εφαρμογής

4.1.1. Το λογισμικό SAGA

Το λογισμικό SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) αναπτύχθηκε το 2001, από μια επιστημονική ομάδα του Πανεπιστημίου Göttingen, της Γερμανίας (σήμερα η ομάδα εδράζεται στο Πανεπιστήμιο του Αμβούργου), ενώ το 2004 δόθηκε στη δημοσιότητα με μια άδεια χρήσης λογισμικού ανοικτού κώδικα. Το πρόγραμμα κωδικοποιείται σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και διαθέτει ένα οργανωμένο σύνολο βιβλιοθηκών, παρέχοντας στον χρήστη ευχέρεια και ευελιξία στην εφαρμογή χωρικών αλγορίθμων. Το εν λόγω λογισμικό GIS ανοικτού κώδικα χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επεξεργασία χωρικών δεδομένων και στην εφαρμογή διαφόρων γεωεπιστημονικών μεθόδων. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε χρήση του λογισμικού αυτού για την δημιουργία και προεπεξεργασία των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων, καθώς και για την εξαγωγή των γεωμορφομετρικών και ορισμένων υδρογραφικών χαρακτηριστικών.

4.1.2. Το λογισμικό MATLAB

Το MATLAB (matrix laboratory) είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον προγραμματισμού, αναπτυγμένο από την MathWorks, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς της μηχανικής, της επιστήμης και της οικονομίας. Επιτρέπει χειρισμούς πινάκων, την εφαρμογή των αλγορίθμων, και διασυνδέεται με προγράμματα που είναι γραμμένα σε άλλες γλώσσες, όπως C, C++, Java και Fortran. Στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB εκτελέστηκε ένα σημαντικό μέρος της εργασίας, το οποίο αφορά την σύγκριση των παραγόμενων μοντέλων, με το ψηφιακό μοντέλο αναφοράς και επιπλέον την δημιουργία ιστογραμμάτων και γραφικών παραστάσεων. Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι για την απόδοση απλών διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν γραφικά εργαλεία που περιλαμβάνονται στο λογισμικό Microsoft Excel.

4.1.3. Το λογισμικό ArcGIS

Το λογισμικό ArcGIS της εταιρείας ESRI παρέχει την υποδομή για την κατασκευή χαρτών και την διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών. Περιλαμβάνει ένα πακέτο ανεξάρτητων λογισμικών: το ArcCatalog, το ArcGlobe, το ArcMap και το ArcReader, ArcScene. Κατά το στάδιο της εφαρμογής, επιλέχθηκε η χρήση του προγράμματος ArcMap, με στόχο την οπτικοποίηση των προϊόντων σύγκρισης των ψηφιακών μοντέλων και την ορθή παρουσίαση τους.

4.2. Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων από Δεδομένα LiDAR

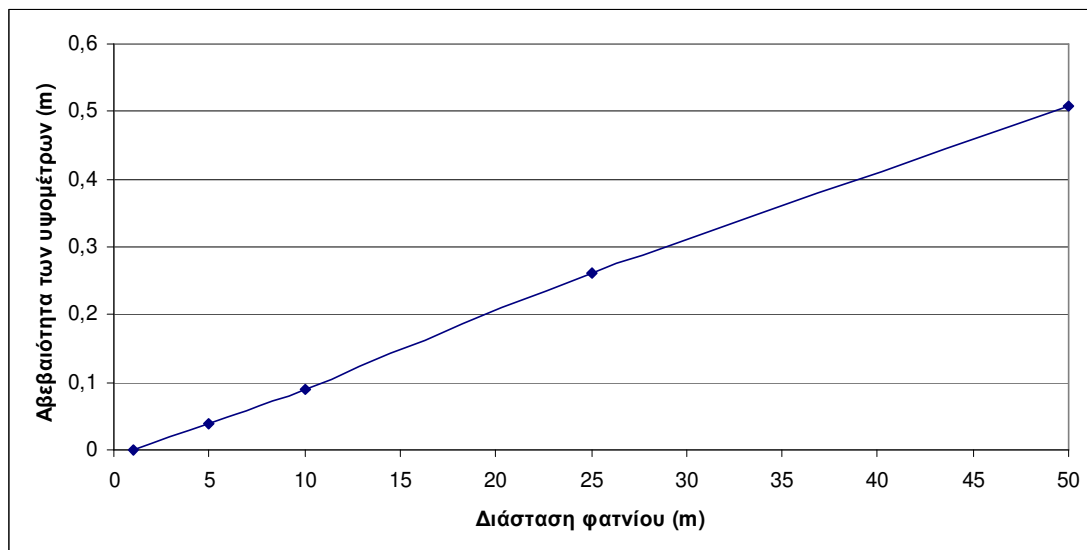
Το πρώτο βήμα κατά την εκτέλεση της εργασίας αφορά στην διαδικασία αναπαράστασης των αρχικών χωρικών δεδομένων σε μία σειρά ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων διαφορετικής χωρικής ανάλυσης, τα οποία θα αποτελέσουν την βάση για την εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών. Η μέθοδος της παρεμβολής εφαρμόζεται στο λογισμικό SAGA με δεδομένο εισόδου τα νέφη των σημείων από δεδομένα LiDAR (αριθμός σημείων: 19.897.623, υψομετρική ακρίβεια: 0,2-1m), για την δημιουργία πέντε ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων, με βήμα καννάβου (cell size) 1 m, 5 m, 10 m, 25 m και 50 m. Επιπλέον, για την εφαρμογή της μεθόδου αντιστρόφου απόστασης (moving average) καθορίστηκε ως ένα κινούμενο παράθυρο ο κύκλος, με ακτίνα τα 20 m, και μέγιστο αριθμό σημείων τα 5 σημεία, για κάθε παραγόμενο μοντέλο υψομέτρων. Ακόμη, ορίστηκαν οι συντεταγμένες στα όρια του καννάβου, οι οποίες είναι κοινές στις πέντε περιπτώσεις των μοντέλων και ορίζουν μία περιοχή έκτασης 8,5425 km² (8.542.500 m²). Μία ακόμη παράμετρος που είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη είναι η ακρίβεια της μεθόδου παρεμβολής. Η έκφραση της αβεβαιότητας της παρεμβολής, για κάθε μοντέλο, γίνεται χρησιμοποιώντας ως αληθές μέσο υψόμετρο της περιοχής, την τιμή του μέσου υψομέτρου που προκύπτει για το ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης 1 m. Στον **Πίνακα 1** παρατίθενται το μέσο υψόμετρο για κάθε μοντέλο και η απόκλιση των υψομέτρων αυτών σε σχέση με το μέσο υψόμετρο στο μοντέλο αναφοράς.

Πίνακας 1. Μέσο υψόμετρο περιοχής μελέτης για κάθε ΨΜΥ και διαφορά μέσων υψομέτρων από το μέσο υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς

Μέγεθος φατνίου (m)	Μέσο υψόμετρο (m)	Διαφορά μέσων υψομέτρων (m)
1	2350,7143	-
5	2350,6766	0,0377
10	2350,6247	0,0896
25	2350,4524	0,2619
50	2350,2073	0,5070

Γενικότερα, η γνώση της υψομετρικής πληροφορίας είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς παρέχει πληροφορίες σχετικά με το κλίμα, την βλάστηση, την δυναμική ενέργεια που

εντοπίζεται στην περιοχή μελέτης και αποτελεί την βάση στην εξαγωγή μιας σειράς άλλων παραμέτρων. Τέλος, από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 1** παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα των υψομέτρων αυξάνεται γραμμικά (**Εικόνα 15**) με την αύξηση της διάστασης του φατινίου, γεγονός που είναι αναμενόμενο λόγω εξομάλυνσης του αναγλύφου.



Εικόνα 15. Κατανομή της αβεβαιότητας των υψομέτρων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης του ΨΜΥ

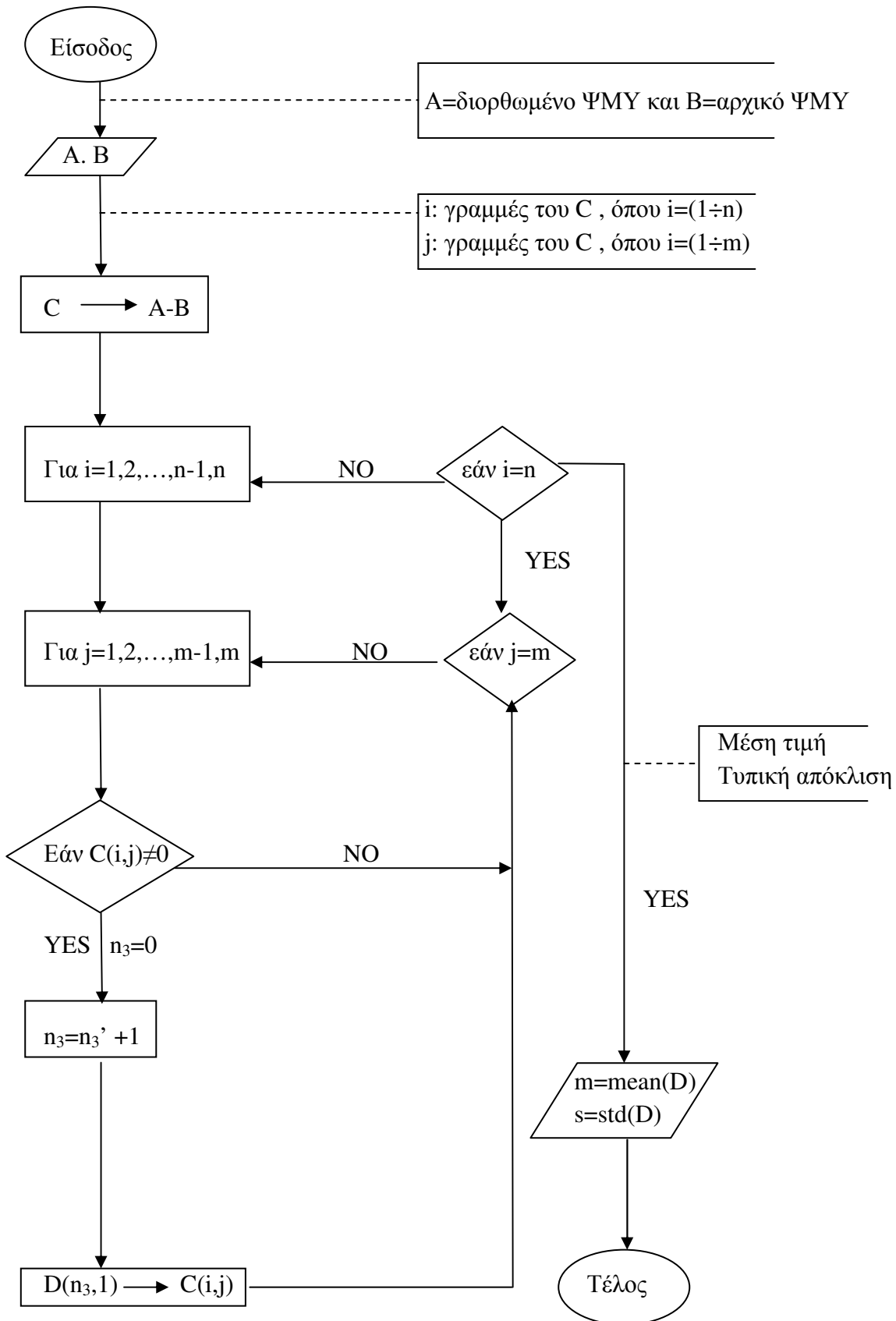
Της διαδικασίας της παρεμβολής έπεται η εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης Gauss, στο λογισμικό SAGA, όπου για κάθε ΨΜΥ οι παράμετροι της συνέλιξης, ορίζονται στον **Πίνακα 2**:

Πίνακας 2. Παράμετροι εφαρμογής φίλτρου Gauss στα ΨΜΥ

Χωρική ανάλυση ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (m)	Τυπική απόκλιση (m)	Ακτίνα επίδρασης του φίλτρου Gauss (m)
1	0,025	2
5	0,05	5
10	0,1	10
25	0,25	25
50	0,5	50

Οι παράμετροι καθορίστηκαν με στόχο την απαλοιφή του θορύβου και παράλληλα την βελτίωση της ποιότητας του μοντέλου, δεδομένου ότι η μείωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας επιβάλλει αύξηση του βαθμού εξομάλυνσης του μοντέλου. Τέλος, διευκρινίζεται ότι η επιλογή του βαθμού της εξομάλυνσης επιλέχθηκε αναλόγως της χωρικής διακριτικής ικανότητας, αποδίδοντας έτσι, με ομαλό τρόπο, τις χαρακτηριστικές λεπτομέρειες.

Στο πλαίσιο προεπεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων, εκτελέστηκε στο πρόγραμμα SAGA, ο αλγόριθμος πλήρωσης των βυθισμάτων των Planchon & Darboux (2001), με δεδομένο εισόδου το εκάστοτε φιλτραρισμένο μοντέλο και δεδομένο εξόδου ένα διορθωμένο (άνευ βυθισμάτων ή depressionless) μοντέλο, έτοιμο για την περαιτέρω υδρολογική ανάλυση. Ο αλγόριθμος επεκτάθηκε μέσω του προγράμματος για την διατήρηση μιας ελάχιστης γωνίας κλίσης στις περιοχές συμπλήρωσης των βυθισμάτων, με προκαθορισμένη τιμή $0,01^\circ$, σε κάθε μοντέλο. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, καθώς συμβάλλει στην δημιουργία διορθωμένων μοντέλων με έγκυρες διευθύνσεις ροής και ορθή οριοθέτηση των λεκανών απορροής. Προκειμένου να υπολογιστούν τα «στατιστικά των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την συμπλήρωση των κοιλοτήτων», εφαρμόστηκε ένας σύντομος αλγόριθμος στο πρόγραμμα MATLAB, ο κώδικας του οποίου επισυνάπτεται στο Παράρτημα I (βλ. σελ. 127) της εργασίας. Για την ευχερή επεξεργασία των δεδομένων στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB, τα ΨΜΥ μετατράπηκαν σε ASCII αρχεία υπό μορφή πίνακα, μέσω του προγράμματος SAGA και στην συνέχεια αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του αλγορίθμου, του οποίου το λογικό διάγραμμα περιγράφεται στην **Εικόνα 16**. Τα αποτελέσματα υπολογισμού των στατιστικών διαφορών των υψομέτρων κατόπιν της πλήρωσης των τοπογραφικών βυθισμάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3** και εμφανίζουν αναμενόμενη συμπεριφορά κατά την αύξηση του μεγέθους του φατνίου, καθώς παρατηρείται μείωση του πλήθους των φατνίων που υφίστανται διόρθωση, και παράλληλα, αύξηση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των διαφορών.



Εικόνα 16. Λογικό διάγραμμα ροής υπολογισμού των στατιστικών διαφορών των υψομέτρων κατόπιν της πλήρωσης των βυθισμάτων, στο λογισμικό MATLAB

Πίνακας 3. Αποτελέσματα και στατιστικά των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου συμπλήρωσης των βυθισμάτων

Μέγεθος φατνίου (m)	Αριθμός διορθωμένων φατνίων (m)	Συνολική επιφάνεια διόρθωσης υψομέτρου (m ²)	Μέση τιμή των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την πλήρωση (m)	Τυπική απόκλιση των διαφορών (m)
1	52.663	52.663	0,0607	0,0987
5	602	15.050	0,1058	0,1708
10	190	19.000	0,2009	0,1901
25	25	15.625	0,4887	0,2769
50	3	7.500	0,5807	0,3716

4.3. Σύγκριση Μοντέλων ως προς τα Γεωμορφομετρικά Χαρακτηριστικά

Εξαγωγή ψηφιακών μοντέλων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών

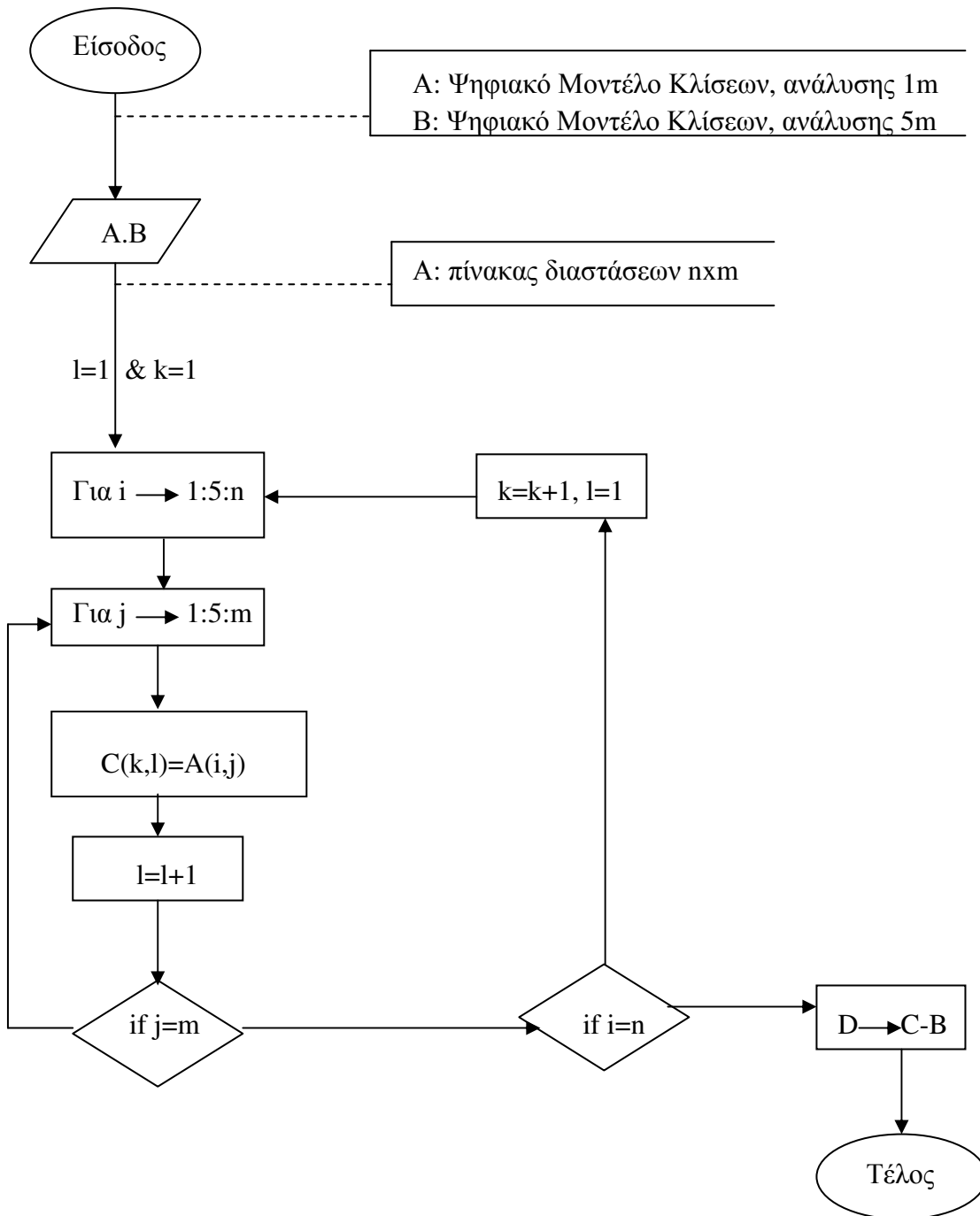
Βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δημιουργούνται στο λογισμικό του προγράμματος SAGA, τα ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της περιοχής μελέτης για κάθε γεωμορφομετρικό χαρακτηριστικό. Η εξαγωγή των παραμέτρων κλίσης, διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, συνιστωσών της καμπυλότητας και συσσώρευσης ροής υπολογίζονται από την βιβλιοθήκη του SAGA - Terrain Analysis/Morphometry. Ως δεδομένα εισόδου επιλέγονται για την μέθοδο των Zevenbergen & Thorne (1987), το εκάστοτε φιλτραρισμένο ΨΜΥ, ενώ για την εφαρμογή του αλγορίθμου Multiple Flow Direction (FD8 algorithm), το εκάστοτε μοντέλο, διορθωμένο από βυθίσματα. Ομοίως και για τους υπολογισθέντες τρεις δείκτες, καθορίζεται η μέθοδος υπολογισμού τους, με την διαφορά ότι τα δεδομένα εισόδου είναι το ψηφιακό μοντέλο κλίσεων και το μοντέλο συσσώρευσης ροής, για την κάθε περίπτωση χωρικής ανάλυσης. Τα ψηφιακά μοντέλα που προέκυψαν επισυνάπτονται στο Παράρτημα II της εργασίας και όπως διαπιστώνεται από τις οπτικοποιήσεις, καθώς η ισοδιάσταση του καννάβου αυξάνεται, η κλίμακα απεικόνισης μικραίνει, και επομένως η επιφάνεια που αναπαρίσταται, γίνεται πιο γενικευμένη, εμφανίζοντας λιγότερες λεπτομέρειες σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς.

Μεθοδολογία σύγκρισης

Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σύγκρισης των ψηφιακών μοντέλων (χωρικής ανάλυσης 5 m, 10 m, 25 m, 50 m), με το μοντέλο αναφοράς -χωρικής ανάλυσης 1 m- ως προς τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά.

Υπολογιστική διαδικασία στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB

Τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά ανταποκρίνονται, με διαφορετικό τρόπο, στην μεταβολή του διάστασης του φατνίου των ΨΜΥ, από 5 έως 50 m. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι διαφορές των τιμών, για κάθε χαρακτηριστικό, του μοντέλου μικρότερης ανάλυσης από το μοντέλο αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος εφαρμογής στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB. Τα προς σύγκριση μοντέλα εισήχθησαν στον αλγόριθμο, υπό την μορφή αρχείων ASCII -τα οποία εξάχθηκαν από το λογισμικό του SAGA- περιέχοντας σε γραμμές και στήλες την πληροφορία της τιμής του γεωμορφομετρικού χαρακτηριστικού για κάθε φατνίο. Η διαδικασία υπολογισμού της διαφοράς των τιμών πραγματοποιήθηκε στις κοινές συντεταγμένες των ΨΜΥ, δεδομένου ότι τα μοντέλα αυτά έχουν κοινά όρια καννάβου και πολλαπλάσιο βήμα. Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι στα ψηφιακά μοντέλα εντοπίζονται δύο περιοχές έλλειψης δεδομένων LiDAR, στα αντίστοιχα φατνία έχει αποδοθεί από το πρόγραμμα SAGA, μία καθορισμένη τιμή (-99.999) κατά την δημιουργία των ASCII αρχείων. Η διαδικασία του προγραμματισμού απέδωσε ένα ASCII αρχείο για κάθε χαρακτηριστικό, στο οποίο, όπως είναι προφανές, ο αριθμός των γραμμών και των στηλών που περιέχει, ταυτίζεται με εκείνον του ψηφιακού μοντέλου της μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης κατά την σύγκριση. Επιπλέον, στα τμήματα έλλειψης δεδομένων, τα οποία αντιστοιχούν σε περιοχές λιμνών, αναμένεται ο υπολογισμός της διαφοράς των τιμών στα φατνία να αποδώσει μηδενική τιμή. Στο Παράρτημα I (βλ. σελ. 127) επισυνάπτεται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος MATLAB, ο οποίος περιγράφεται στην **Εικόνα 17** υπό μορφή λογικού διαγράμματος, για την πιο εύληπτη κατανόηση της εφαρμογής.



Εικόνα 17. Λογικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού των διαφορών των μοντέλων, στο λογισμικό MATLAB

Οπτικοποίηση των μοντέλων διαφοράς στο λογισμικό ArcGIS

Κάθε αρχείο εξόδου της μορφής ASCII, του λογισμικού MATLAB, υφίσταται επεξεργασία με τελικό σκοπό την οπτικοποίηση του αποτελέσματος των διαφορών. Έτσι, σε κάθε αρχείο εισήχθησαν οι πληροφορίες του καννάβου (αριθμός γραμμών, αριθμός στηλών, συντεταγμένες X,Y της κάτω αριστερής γωνίας, διάσταση φατνίου, απόδοση της τιμής -99.999 σε περιοχές έλλειψης δεδομένων), προκειμένου να αποδοθεί σε ψηφιδωτή μορφή (raster). Η οπτικοποίηση του αποτελέσματος της σύγκρισης έγινε

χρησιμοποιώντας βασικά εργαλεία (ArcToolbox) του προγράμματος ArcMap, τα οποία παρέχουν ευκολότερη διαχείριση της πληροφορίας.

Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων

Σημαντικό στάδιο της μελέτης αποτελεί ο υπολογισμός των στατιστικών στοιχείων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) των διαφορών των μοντέλων, για τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Η γνώση των στατιστικών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σύγκρισης, καθώς δίνει μια γενικότερη εικόνα της τάξης μεγέθους της διαφοράς των τιμών των μοντέλων στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά. Με λίγα λόγια, η στατιστική επεξεργασία ποσοτικοποιεί τη διαδικασία της σύγκρισης των μοντέλων. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι, στον υπολογισμό του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών δεν συμπεριλήφθηκαν οι μηδενικές τιμές στα φατνία έλλειψης δεδομένων (περιοχές λιμνών), δεδομένου ότι τα στατιστικά στοιχεία, είναι απαραίτητο να προκύπτουν, από τις τιμές και το πλήθος των «ενεργών» σημείων. Ωστόσο, οι περισσότεροι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε ένα πλέγμα φατνίων 3X3 και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα γειτονικά φατνία να επηρεάζονται από την έλλειψη των δεδομένων, στις περιοχές των λιμνών. Για τον λόγο αυτό, αφαιρέθηκαν οι τιμές των επηρεαζόμενων φατνίων, από τις τιμές του δείγματος υπολογισμού των στατιστικών. Οι μηδενικές τιμές, που έπρεπε να απομακρυνθούν από το δείγμα, αντικαταστάθηκαν στον κάθε πίνακα διαφορών των τιμών του MATLAB, από την τιμή -99.999, η οποία χαρακτηρίζει περιοχή έλλειψης δεδομένων. Επομένως, η αποθήκευση του αρχείου έγινε με το σωστό δείγμα τιμών των «ενεργών» σημείων και τα στατιστικά καταγράφηκαν κατά την οπτικοποίηση στο πρόγραμμα ArcMap. Τέλος, επισημαίνεται ότι στις περιπτώσεις που κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίαση των ιστογραμμάτων των διαφορών, η δημιουργία τους πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των λογισμικού MATLAB.

4.4. Σύγκριση Μοντέλων ως προς τα Υδρογραφικά Χαρακτηριστικά

Εξαγωγή ψηφιακών μοντέλων υδρογραφικών χαρακτηριστικών

Βάσει του θεωρητικού υποβάθρου της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή διακριτών χωρικών αντικειμένων της γήινης επιφάνειας, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της χωρικής ανάλυσης σε αυτά. Η διαδικασία μέτρησης και ανάλυσης διακριτών χαρακτηριστικών, τα οποία οριοθετούνται με ευκρίνεια στην επιφάνεια του εδάφους, άπτεται του αντικειμένου της ειδικής γεωμορφομετρίας (Pike et al., 2009). Τα προσδιοριζόμενα αντικείμενα αναπαρίσταται με διανυσματική μορφή στο κάθε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και είναι τα εξής: η έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden και το υδρογραφικό της δίκτυο. Η εξαγωγή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε από μία διευρυμένη έκταση της περιοχής μελέτης, η οποία καλύπτει 13,11 km² (13.110.000 m²). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να αποδοθούν πλήρως στο εκάστοτε ΨΜΥ, οι υδρογραφικές παράμετροι της υπό μελέτη περιοχής. Επιπλέον, διευκρινίζεται ότι η σύγκριση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών επιλέχθηκε να γίνει σε μία μικρότερη έκταση της περιοχής μελέτης,

ώστε να είναι ευκολότερη η διαχείριση του όγκου της πληροφορίας, στα λογισμικά εφαρμογής. Ο υπολογισμός των υδρογραφικών χωρικών δεδομένων, καθώς και τα στάδια προεπεξεργασίας των ΨΜΥ πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό SAGA. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για την ορθή λειτουργία των αλγορίθμων υπολογισμού των ρεμάτων και των λεκανών απορροής, συμπληρώθηκαν σε κάθε ψηφιακό μοντέλο τα τμήματα έλλειψης υψομέτρων τα οποία αντιστοιχούσαν σε περιοχές λιμνών. Η συμπλήρωση του υψομέτρου στα φατνία όπου απουσίαζε η πληροφορία, έγινε θέτοντας μια ακέραια τιμή χαμηλότερη των γειτονικών τους φατνίων.

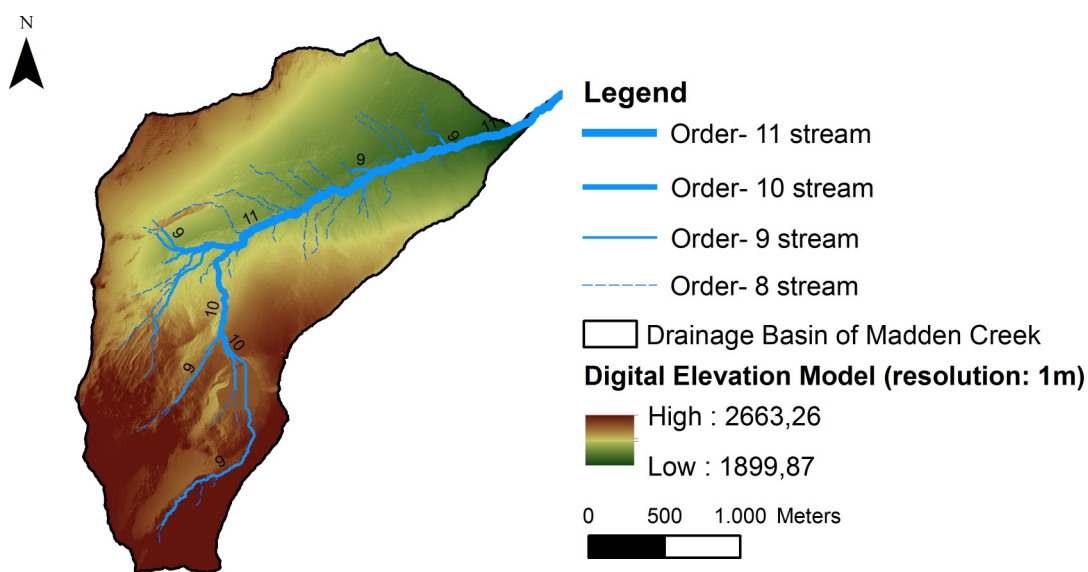
Η προεπεξεργασία των μοντέλων ακολούθησε την καθορισμένη διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 4.2 και αφορά την εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης (χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους εφαρμογής του **Πίνακα 2**) και του αλγορίθμου συμπλήρωσης των βυθισμάτων. Αναφορικά με τον αλγόριθμο πλήρωσης των βυθισμάτων, και ύστερα από πειραματισμούς διαπιστώθηκε ότι η επιλογή της ελάχιστης γωνίας που διατηρείται στις περιοχές πλήρωσης των βυθισμάτων, έχει επίπτωση στις παραμέτρους που εξάγονται στη συνέχεια της επεξεργασίας και κυρίως για τα μοντέλα των υψηλότερων χωρικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι στα μοντέλα των υψηλότερων αναλύσεων, αυξάνοντας την γωνία, τα μήκη του υδρογραφικού δικτύου μειώνονταν και η έκταση μεταβαλλόταν χωρίς να ακολουθεί σε όλα τα μοντέλα το ίδιο μοτίβο. Επομένως, στα ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1 m, 5 m, 10 m επιλέχθηκε να διατηρηθεί ως ελάχιστη γωνία η τιμή των $0,45^\circ$, ενώ στα μοντέλα της χαμηλότερης ανάλυσης των 25 m και των 50 m ορίστηκε η τιμή των $0,5^\circ$. Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι ο αλγόριθμος πλήρωσης των βυθισμάτων εφαρμόστηκε, εφόσον συμπληρώθηκαν οι περιοχές έλλειψης δεδομένων, με σκοπό να επεξεργαστεί και τις αυθαίρετα συμπληρωμένες τιμές από τον χρήστη και έτσι το υδρογραφικό δίκτυο να αποδοθεί άρτια στο εκάστοτε μοντέλο. Στο πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα «στατιστικά των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την πλήρωση» για την περιοχή εξαγωγής των υδρογραφικών χαρακτηριστικών της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα και στατιστικά στοιχεία εφαρμογής του αλγορίθμου συμπλήρωσης βυθισμάτων για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής

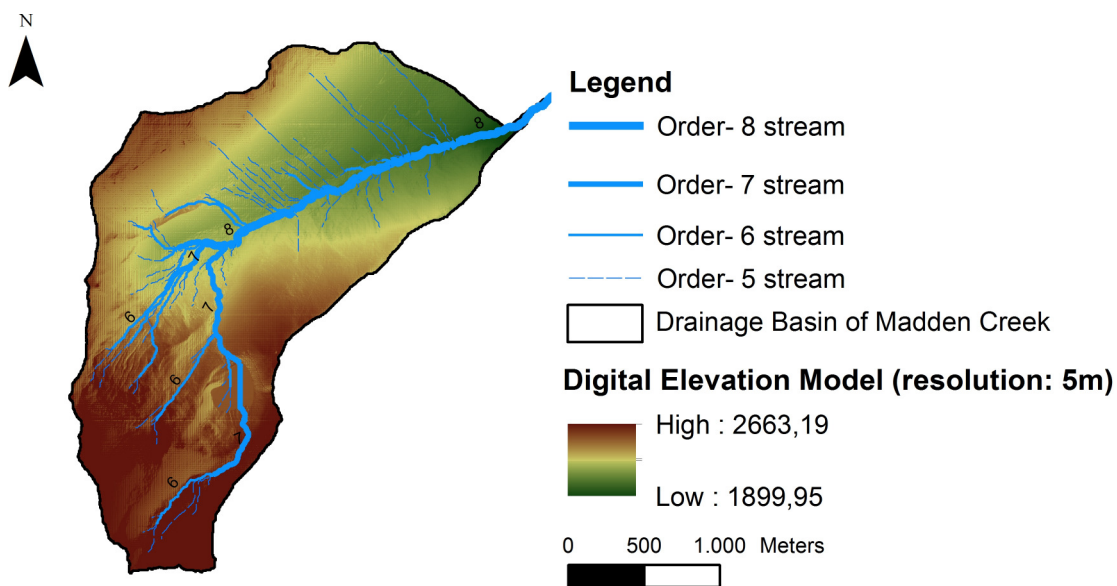
Μέγεθος φατνίου (m)	Αριθμός διορθωμένων φατνίων (m)	Συνολική επιφάνεια διόρθωσης υψομέτρου (m ²)	Μέση τιμή των διαφορών υψομέτρου πριν και μετά την πλήρωση (m)	Τυπική απόκλιση των διαφορών (m)
1	122.226	122.226	1,286	1,415
5	3165	79.125	1,845	1,293
10	724	72.400	1,991	1,193
25	110	68.750	1,945	1,121
50	19	47.500	1,298	0,673

Η μείωση του πλήθους των φατνίων που υφίστανται διόρθωση κατά την αύξηση της διάστασης του καννάβου είναι στα αναμενόμενα πλαίσια.

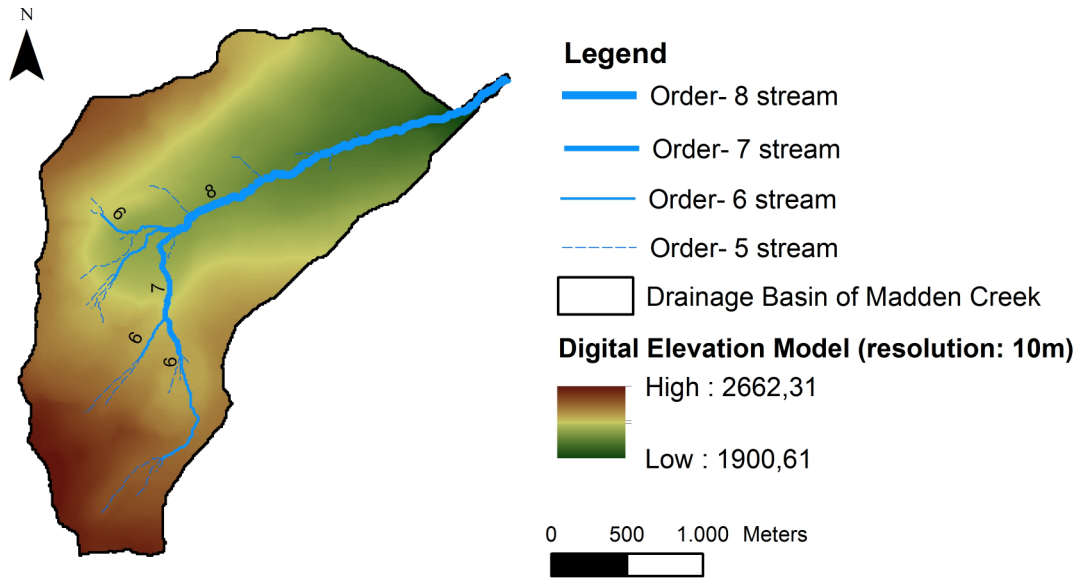
Την διαδικασία συμπλήρωσης των κοιλοτήτων ακολούθησε η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης από το λογισμικό SAGA, με δεδομένο εισόδο το εκάστοτε ΨΜΥ διορθωμένο από βυθίσματα. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω της βιβλιοθήκης Terrain Analysis/Hydrology/Channel Network & Drainage Basins, όπου επιλέχθηκε η ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler και ο βαθμός λεπτομέρειας του υδρογραφικού δικτύου. Τα αποτελέσματα ιεράρχησης του δικτύου ρεμάτων παρουσιάζονται στις *Εικόνες 18a, 18b, 18c, 18d & 18e*.



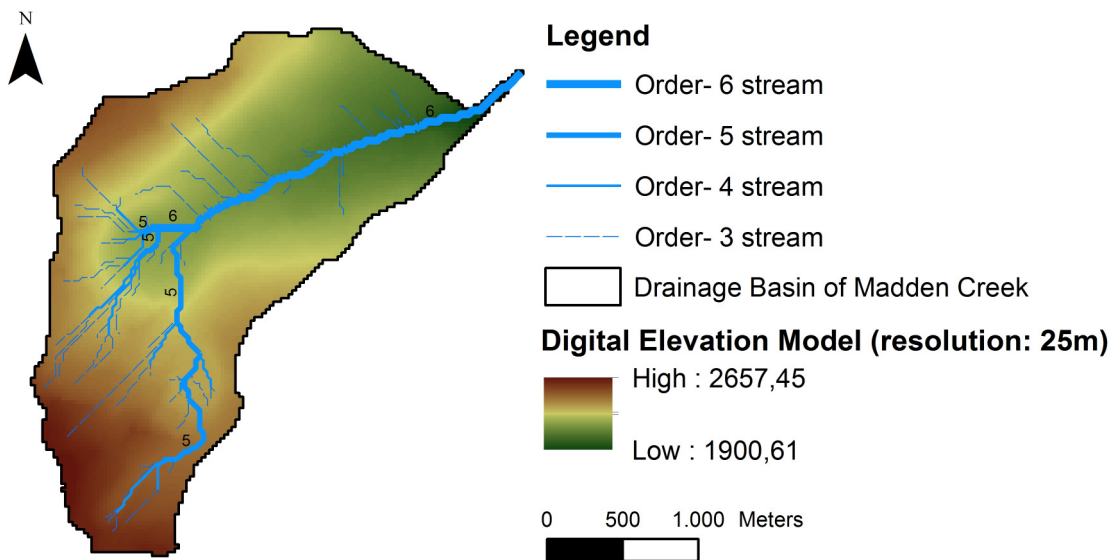
Εικόνα 18a. Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 1 m



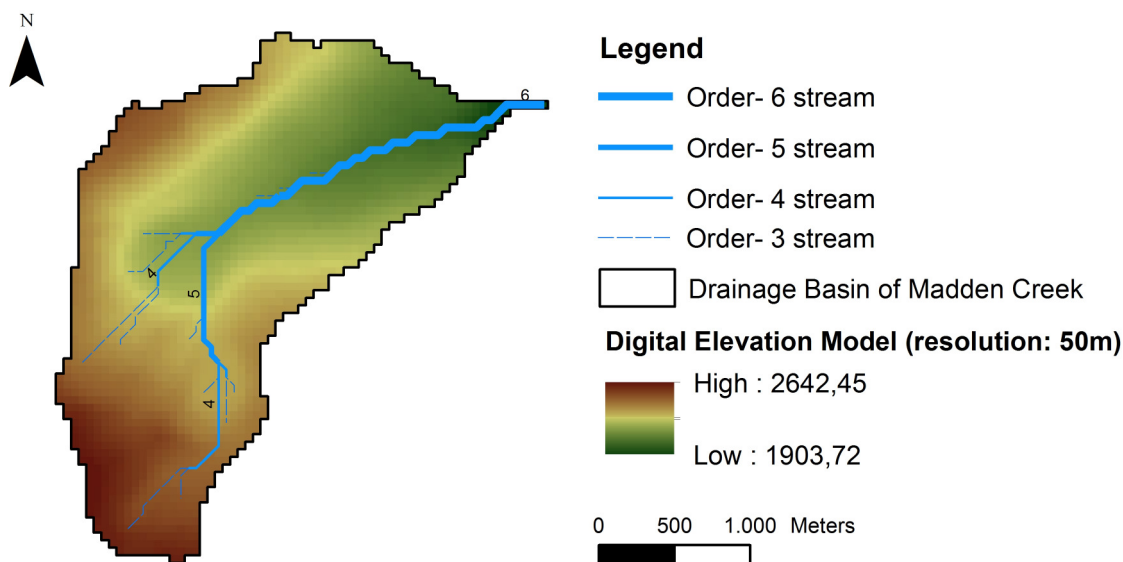
Εικόνα 18b. Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 5 m



Εικόνα 18c. Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 10 m



Εικόνα 18d. Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 25 m



Εικόνα 18ε. Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου στο ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 50 m

Σε γενικές γραμμές, η μορφολογία της περιοχής που ερευνάται διαμορφώνει ένα σύνθετο αποστραγγιστικό δίκτυο, το οποίο σχηματίζεται στην λεκάνη απορροής του κύριου υδατορεύματος Madden, με τελικό αποδέκτη τη λίμνη Ταχόη. Όπως είναι αναμενόμενο, καθώς αυξάνεται το μέγεθος του κελιού στον κάνναβο, προοδευτικά χάνεται πληροφορία κατά την αναπαράσταση. Για παράδειγμα, για μέγεθος φατνίου ίσο με 50 m, η τεχνητή εξομάλυνση των γεωμορφών σε πολύπλοκα τοπία, έχει ως αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν τις υδρολογικές διαδικασίες, να περιορίζονται. Οπότε, όπως είναι φανερό, η επιλογή της κλίμακας μπορεί να επισκιάσει σημαντικές λεπτομέρειες. Ως απόρροια αυτού, τα χαμηλής τάξεως ρεύματα δεν απεικονίζονται στην περίπτωση του ΨΜΥ των 50 m, λόγω του μεγέθους του φατνίου. Επομένως, η επιλογή της χωρικής ανάλυσης έχει άμεση επίπτωση στην ιεράρχηση των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου, καθώς επηρεάζει τον βαθμό λεπτομέρειας στην χαρτογραφική αναπαράσταση. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι ο βαθμός της μέγιστης τάξης του υδρογραφικού δικτύου μειώνεται κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου, καθώς στο ΨΜΥ ανάλυσης 1 m παρατηρείται η 11^η ως μέγιστη τάξη, στα μοντέλα 5 m και 10 m παρατηρείται η 8^η ως μέγιστη τάξη και στα μοντέλα των 25 m και 50 m, ως μέγιστη τάξη εμφανίζεται η 6^η. Η διαφορά αυτή της μέγιστης τάξης στο μοντέλο των 50 m από το μοντέλο αναφοράς οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αβεβαιότητα που εισάγεται κατά τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου στην πολύ αραιότερη ανάλυση των 50m. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι η απόδοση τόσο των ρευμάτων όσο και της υδροκριτικής γραμμής στο κάθε μοντέλο, φαίνεται να ακολουθεί τα όρια των φατνίων, γεγονός που δικαιολογείται από το ότι η διαδικασία είναι τεχνητή και επηρεάζεται άμεσα από την χωρική ανάλυση. Ωστόσο δεν εφαρμόστηκε η διαδικασία γενίκευσης για την πιο ορθή χαρτογραφική απεικόνιση, διότι επιδιώκεται η αξιοποίηση του κάθε προϊόντος (μήκη υδατορευμάτων), ώστε οι μετρήσεις να είναι ανεπηρέαστες από τυχόν διαδικασίες που μεταβάλλουν περαιτέρω την αβεβαιότητα. Ακόμη, υπογραμμίζεται ότι η ιδιαίτερως αυξημένη τάξη του υδρογραφικού δικτύου (μέχρι 11^{ης} τάξης) στο ΨΜΥ του 1 m είναι επιτρεπτή δεδομένου ότι η διαδικασία εξαγωγής του δικτύου των ρευμάτων είναι τεχνητή

και αξιοποιεί μόνο τις τιμές στα φατνία του μοντέλου. Τέλος, όσον αφορά τον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων που περιγράφηκαν στην μεθοδολογική προσέγγιση επισημαίνεται ότι αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα των μοντέλων αυτών (έκταση λεκάνης απορροής, μήκη ρευμάτων) όπως προέκυψαν από μετρήσεις στο πρόγραμμα ArcMap και υπολογισμούς στο περιβάλλον του MATLAB και τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται σε πίνακες και διαγράμματα, τα στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) των υπολογισθεισών παραμέτρων, σε σχέση με την χωρική ανάλυση. Επιπλέον οπτικοποιούνται οι διαφορές των τοπογραφικών χαρακτηριστικών στα συγκρινόμενα μοντέλα και παρατίθεται τα αποτελέσματα υπολογισμού των χαρακτηριστικών υδρολογικού ενδιαφέροντος, με στόχο την διερεύνηση της επίπτωσης, που επιφέρει η αλλαγή της κλίμακας στην απόδοση της μορφολογίας του αναγλύφου.

5.1. Στατιστικά Στοιχεία Ψηφιακών Μοντέλων

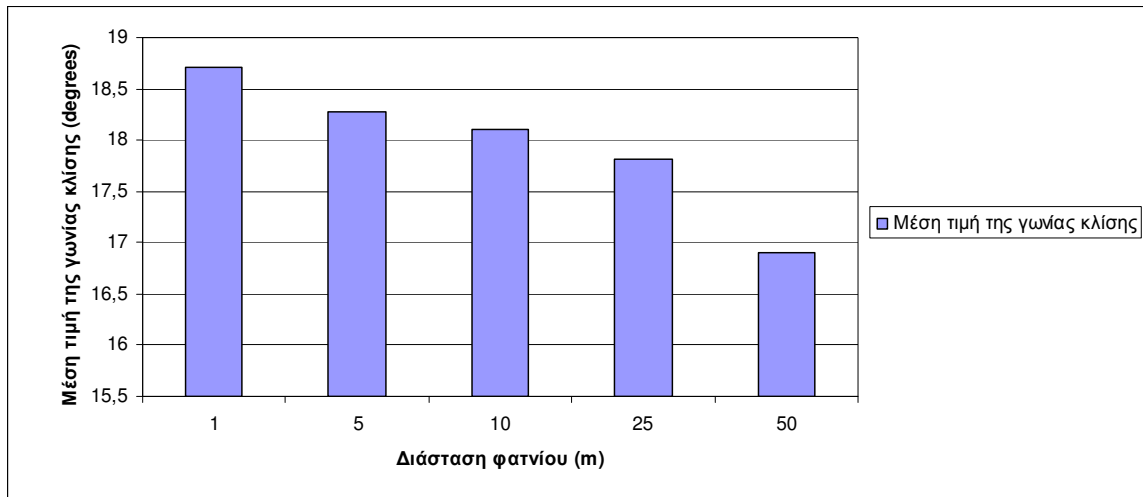
Πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά

➤ Κλίση

Από τα στατιστικά στοιχεία, για την παράμετρο της κλίσης (*Πίνακας 5*), παρατηρείται ότι, καθώς το μέγεθος του φατνίου αυξάνεται, το εύρος των τιμών της κλίσης μικραίνει, γεγονός που είναι αναμενόμενο διότι οι τιμές των κλίσεων εξομαλύνονται. Ειδικότερα, μειώνοντας την χωρική ανάλυση στο μοντέλο, παράγονται μικρότερες τιμές κλίσεων σε έντονες πλαγιές και μεγαλύτερες τιμές σε πλαγιές ήπιας κλίσης (βλ. Παράρτημα II, σελ. 129). Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται και από παρόμοιες μελέτες (Chang & Tsai, 1991, Zhang & Montgomery, 1994).

Πίνακας 5. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων κλίσης

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή της κλίσης (%)	Μέση Τιμή της γωνίας κλίσης (degrees)	Τυπική απόκλιση της γωνίας κλίσης (degrees)
1	33,87	18,71	9,98
5	33,01	18,27	8,59
10	32,70	18,11	8,33
25	32,14	17,82	7,91
50	30,38	16,90	7,05

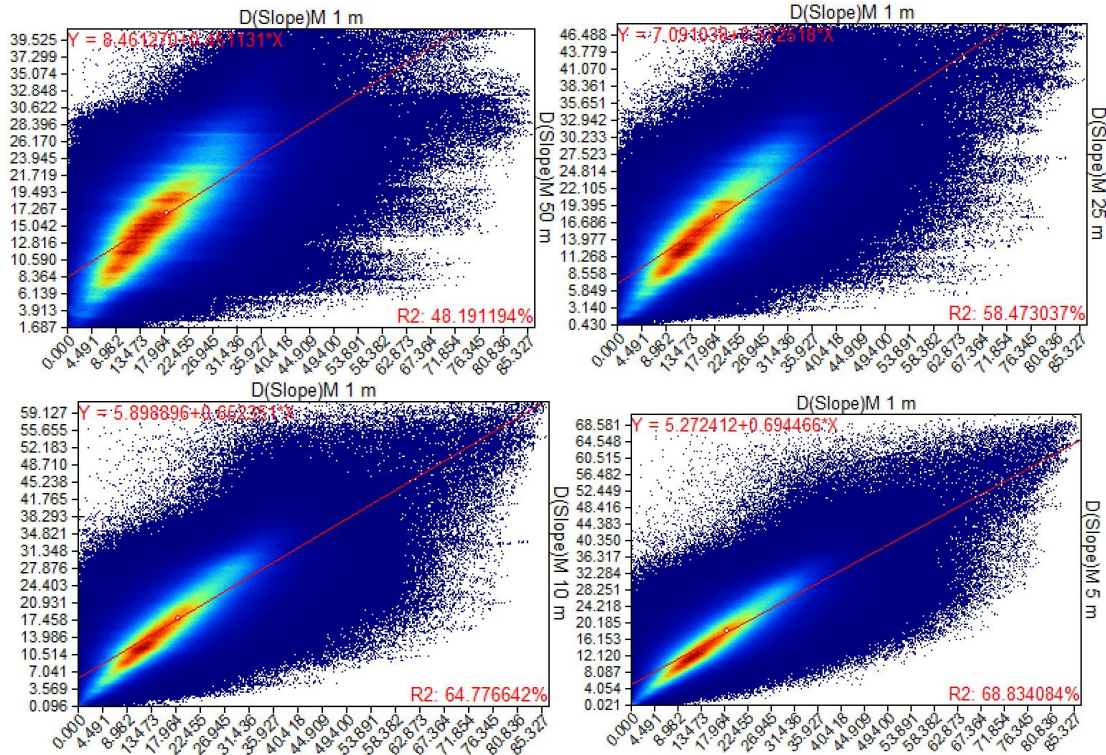


Εικόνα 19. Μέση τιμή της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Συγκεντρωτικά, οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την **Εικόνα 19**, είναι οι ακόλουθες:

- Η ελάττωση της ανάλυσης, που σχετίζεται με αύξηση του μεγέθους του φατνίου, επιφέρει ασάφεια στον καθορισμό της κλίσης για την περιοχή μελέτης.
- Η αύξηση των διαστάσεων των φατνίων στο ψηφιακό μοντέλο προκαλεί υποεκτίμηση της μέσης τιμής της κλίσης, γεγονός που οφείλεται στην ομαλοποίηση που υφίσταται το μοντέλο, με την μείωση της ανάλυσης.

Σε γενικές γραμμές η υποεκτίμηση της μέσης τιμής της κλίσης, κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης, θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερος υπόψη σε μελέτες καθορισμού της σταθερότητας πρηνούς ή μελέτες διάβρωσης από ψηφιακά μοντέλα. Ένας επιπλέον τρόπος παρουσίασης του συσχετισμού, των τιμών της κλίσης, του μοντέλου αναφοράς (χωρικής ανάλυσης 1 m) με τα υπόλοιπα μοντέλα (χωρικών αναλύσεων 5 m, 10 m, 25 m, 50 m), προκύπτει μέσω της δημιουργίας των διαγραμμάτων διασποράς (scatter plots) (**Εικόνα 20**). Τα διαγράμματα διασποράς προέκυψαν μέσω του προγράμματος SAGA και επισυνάπτονται ως ένδειξη της συσχέτισης των τιμών κλίσης, μεταξύ του μοντέλου υψηλότερης ανάλυσης, με τα υπόλοιπα μοντέλα χαμηλότερης ανάλυσης.



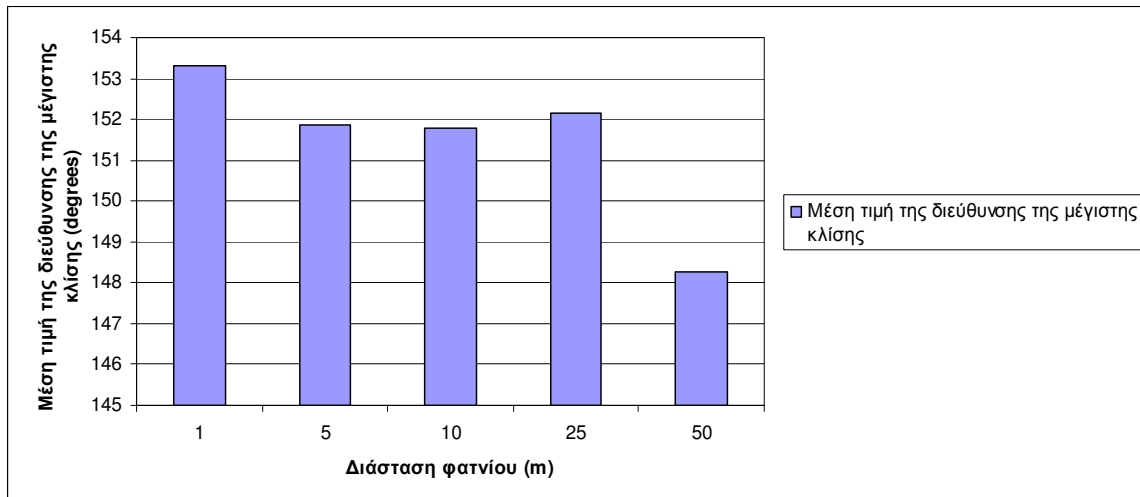
Εικόνα 20. Διαγράμματα διασποράς (scatter plots) των τιμών της γωνίας κλίσης για τα συγκρινόμενα μοντέλα

➤ Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης

Τα αποτελέσματα της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των τιμών κατεύθυνσης της μέγιστης της κλίσης, εμφανίζονται στον Πίνακα 6, όπου διαπιστώνεται μία σταθερότητα της μέσης τιμής, για μέγεθος φατνίου 5 m, 10 m και 25 m.

Πίνακας 6. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση Τιμή (degrees)	Τυπική απόκλιση (degrees)
1	153,3016	112,4985
5	151,8454	112,9939
10	151,7762	113,287
25	152,1535	113,6945
50	148,2771	113,3312



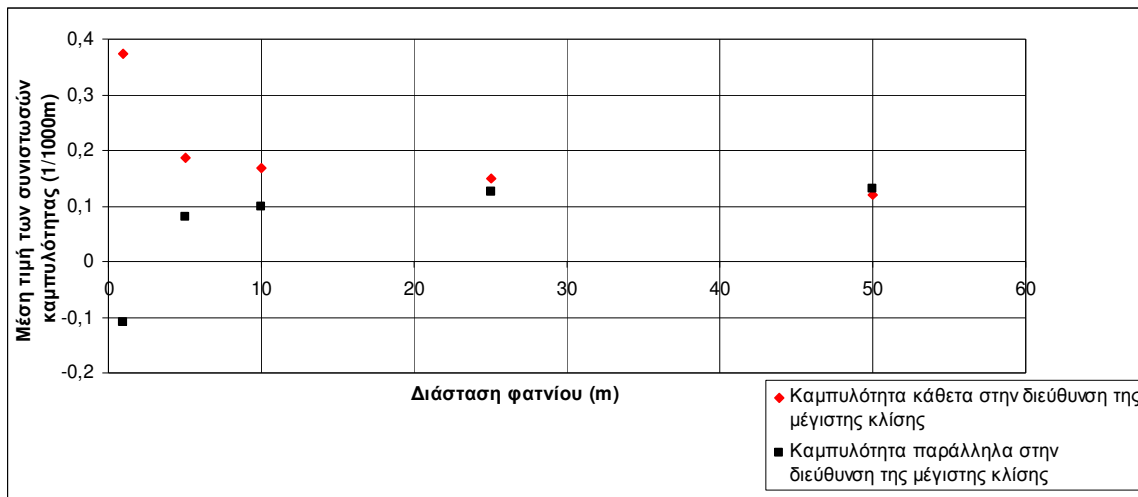
Εικόνα 21. Μέση τιμή της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

➤ Καμπυλότητες

Οι βασικές συνιστώσες της καμπυλότητας, η καμπυλότητα κάθετα (plan curvature) και παράλληλα (profile curvature) στην κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης, υπολογίστηκαν για κάθε ΨΜΥ, διαφορετικής ανάλυσης, και όπως προκύπτει από τις οπτικοποιήσεις των ψηφιακών μοντέλων, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τα άλλα υπολογισθέντα χαρακτηριστικά (βλ. Παράρτημα II, σελ. 133). Για τις δύο περιπτώσεις προσδιορισμού των τιμών καμπυλότητας, παρατηρείται ότι αυξάνοντας την ισοδιάσταση του καννάβου, παρατηρούνται σταδιακά μικρότερες διαβαθμίσεις των τιμών. Πράγματι, η αύξηση του μεγέθους του φατνίου, δημιουργεί έντονη υποεκτίμηση των τιμών, για τις δύο διαστάσεις της καμπυλότητας (**Πίνακας 7**). Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα ΨΜΥ, χαμηλής ανάλυσης, δεν αποτελεί αποδοτικό δεδομένο για τον χαρακτηρισμό μιας περιοχής υπό τους όρους «κυρτότητας» και «κοιλότητας» του εδάφους. Το στοιχείο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό σε περιπτώσεις ελέγχου της καθίζησης και μεταφοράς υλικού, ή μελέτης των υδρολογικών συνθηκών, καθώς εντοπίζεται ο κίνδυνος λαθεμένης αναπαράστασης της τοπογραφικής σύγκλισης και απόκλισης της επιφάνειας.

Πίνακας 7. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων καμπυλότητας

Διάσταση φατνίου (m)	Καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης		Καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης	
	Μέση Τιμή (1/m)	Τυπική απόκλιση (1/m)	Μέση Τιμή (1/m)	Τυπική απόκλιση (1/m)
1	0,000373	0,219428	-0,000108	0,309563
5	0,000186	0,025007	8,10E-05	0,028014
10	0,000169	0,010722	9,96E-05	0,011769
25	0,00015	0,004641	0,000125	0,004975
50	0,000121	0,002163	0,000130	0,002217



Εικόνα 22. Μέση τιμή των συνιστωσών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Τέλος, παρατηρείται από την **Εικόνα 22**, ότι και στις δύο περιπτώσεις καμπυλότητας, για μέγεθος φατνίου από 10m και άνω, η μέση τιμή των μοντέλων τείνει σε μία σταθερή τιμή, δηλαδή παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στις υπολογισμένες μέσες τιμές.

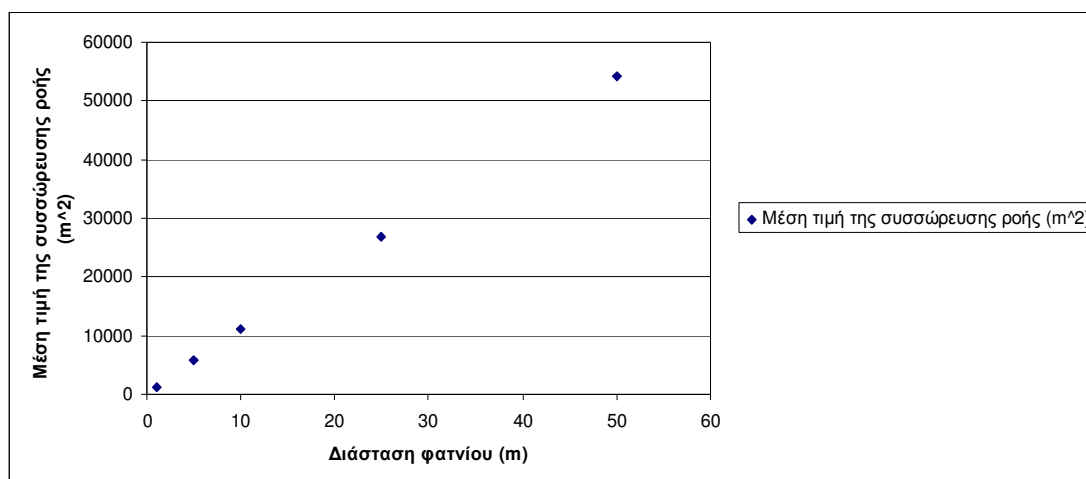
➤ Συσσώρευση ροής

Κατά την δημιουργία ενός καννάβου μικρότερης χωρικής ανάλυσης, είναι προφανές ότι αλλάζει ο αριθμός των τετραγωνικών φατνίων, στα οποία η επιφάνεια διαιρείται. Το γεγονός αυτό, έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την μελέτη των λεκανών, όπου υπολογίζεται για κάθε φατνίο ο όγκος του νερού που απορρέει από τα γειτονικά του. Γενικότερα, η ελάττωση της χωρικής ανάλυσης επιφέρει αύξηση της έκτασης της ανάντη λεκάνης απορροής σε κάθε φατνίο, με τα μεγαλύτερα σφάλματα να συγκεντρώνονται σε περιοχές μικρών λεκανών απορροής. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς το μέγεθος του κελίου στον κάνναβο αυξάνει, η ελάχιστη επιφανειακή μονάδα μέτρησης στο ψηφιακό μοντέλο αυξάνεται, και ως εκ τούτου αυξάνονται οι ελάχιστες απόλυτες τιμές της έκτασης της

ανάντη συμβάλλουσας περιοχής. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της συσσώρευσης ροής υπολογίζει πιο αυξημένους όγκους απορροής ανά φατνίο, όσο η διάσταση του καννάβου αυξάνεται (**Πίνακας 8**). Η διαγραμματική αναπαράσταση της μεταβολής της μέσης τιμής για το χαρακτηριστικό αυτό (**Εικόνα 23**), υποδηλώνει μία γραμμική σχέση μεταξύ των μέσων τιμών, σε συνάρτηση με τη χωρική ανάλυση.

Πίνακας 8. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων συσσώρευσης ροής

Διάσταση φατνίου	Μέση Τιμή του όγκου απορροής ανά φατνίο (m ³)	Τυπική απόκλιση (m ²)
1	1263,8574	35189,5450
5	5704,4773	83847,7871
10	11044,9096	115994,3525
25	26853,1469	179941,3767
50	54136,0905	237466,5389



Εικόνα 23. Μέση τιμή της συσσώρευσης ροής των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Δευτερεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά

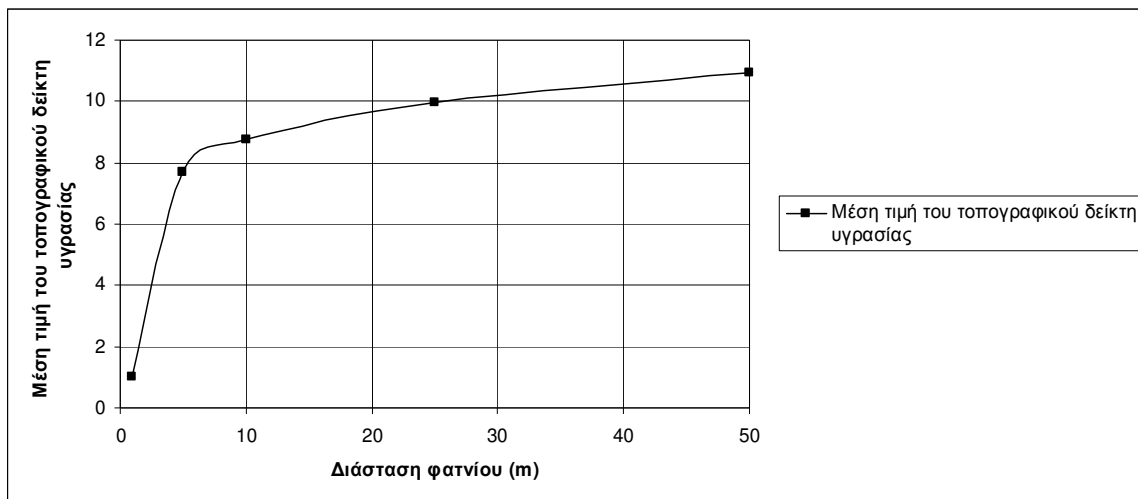
➤ Τοπογραφικός δείκτης υγρασίας

Όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο προσδιορισμός του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας για κάθε ΨΜΥ, βασίζεται στο υδρολογικό μοντέλο TOPMODEL των Beven και Kirby (1979). Γενικώς, τα υδρολογικά μοντέλα που ενσωματώνουν ψηφιακά δεδομένα εμφανίζουν ευαισθησία στην μεταβολή της χωρικής κλίμακας, εξαιτίας των διαφορετικών απεικονίσεων των υδρολογικών παραμέτρων (Quinn et al, 1991). Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα (**Πίνακας 9 & Εικόνα 24**), ο δείκτης μεταβάλλεται ομαλά από χαμηλές σε υψηλές τιμές, καθώς η θέση μεταφέρεται από έντονες σε ήπιες κλίσεις. Επιπλέον, λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές του στα σχηματιζόμενα ρεύματα της

περιοχής μελέτης, αλλά και σε επίπεδες κοιλάδες, όπου εντοπίζεται διατήρηση της υγρασίας του εδάφους (βλ. Παράρτημα ΙΙ, σελ. 137).

Πίνακας 9. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων τοπογραφικού δείκτη υγρασίας

Διάσταση φατνίου	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση
1	1	1,6902
5	7,7076	1,4576
10	8,7662	1,4661
25	9,9711	1,4432
50	10,9522	1,3707

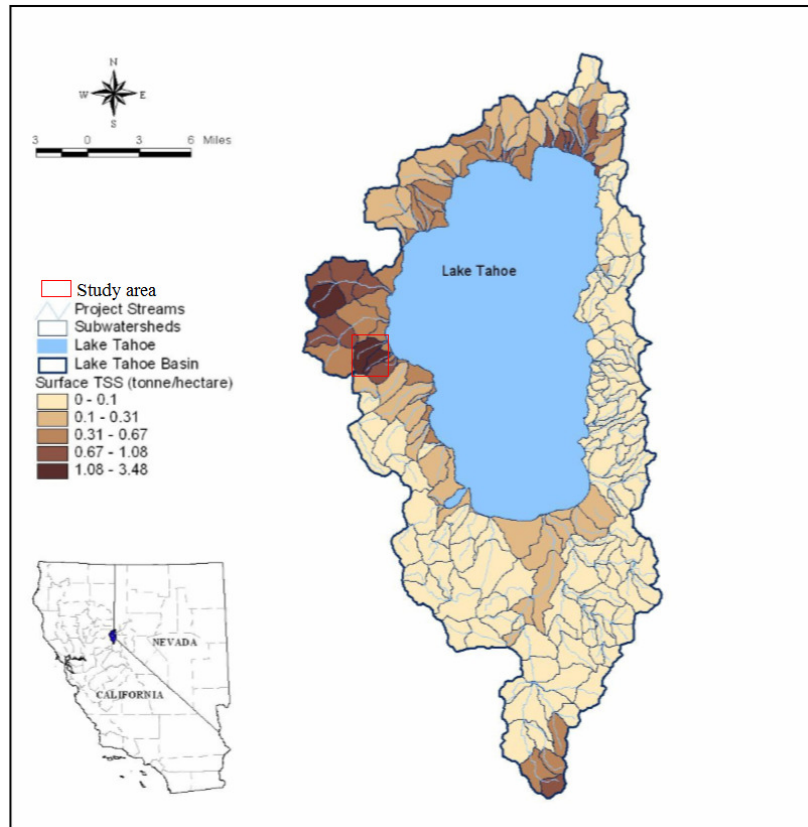


Εικόνα 24. Μέση τιμή του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Με την αύξηση του μεγέθους του φατνίου, άλλοτε υπάρχει μια μεγαλύτερη μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας και άλλοτε μικρότερη. Ως επακόλουθο αυτού, εντοπίζεται η αύξηση των προβλεπόμενων ζωνών κορεσμού, γεγονός που δικαιολογείται από το ότι τα υδρολογικά μοντέλα έχουν την τάση να υπολογίζουν αυξημένο όγκο απορροής, καθώς η ισοδιάσταση του καννάβου αυξάνει (Quinn et al., 1991). Επομένως, προκύπτει ως γενικός κανόνας ότι τα χαμηλής ανάλυσης ΨΜΥ υπερεκτιμούν τις τιμές του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, υποδεικνύοντας μια υψηλή πιθανότητα κορεσμού του εδάφους. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα αναπαράστασης της μέσης τιμής του υπό εξέταση δείκτη, συναρτήσει της ισοδιάστασης του καννάβου, παρατηρείται ένα διαφορετικό μοτίβο μεταβολής των τιμών. Για μέγεθος φατνίου από 10 m έως 50 m εμφανίζεται μια τάση γραμμικής μεταβολής του δείκτη, ενώ έως την ανάλυση των 10m εντοπίζεται η τάση λογαριθμικής μεταβολής των μέσων τιμών (Kienzle, 2004).

➤ Συντελεστής αναγλύφου LS

Η κατανομή του συντελεστή αναγλύφου LS, στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους υποδεικνύει το χωρικό πρότυπο της διαβρωτικής ικανότητας του εδάφους, για την περιοχή μελέτης. Γενικότερα, βάσει των ψηφιακών μοντέλων του δείκτη παρατηρείται ότι η υπό εξέταση περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλή ικανότητα διάβρωσης λόγω έντονων κλίσεων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από χάρτες της περιοχής της Λίμνης Ταχόης, όπου παρουσιάζεται αυξημένη ετήσια απόδοση ιζήματος για την λεκάνη απορροής του ποταμού Madden (*Εικόνα 25*).



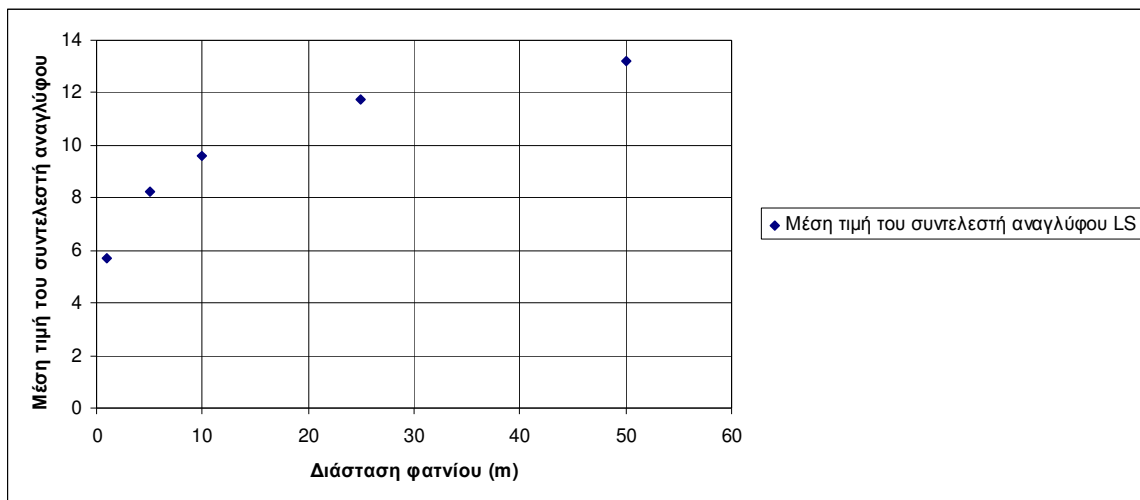
Εικόνα 25. Ετήσια συνολική απόδοση ιζήματος (Total Suspended Solids) για τις υπολεκάνες της Λίμνης Ταχόης

Πηγή: Roberts, 2007

Βάσει των ψηφιακών μοντέλων του συντελεστή αναγλύφου, διαπιστώνεται ότι εξομαλύνοντας την χωρική ανάλυση του καννάβου, παράγονται λιγότερα φατνία με χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αναγλύφου (βλ. Παράρτημα II, σελ. 139) και επομένως αυξάνεται η μέση τιμή (*Πίνακας 10 & Εικόνα 26*). Άρα υπάρχει μία τάση, κατά την αύξηση της διάστασης του φατνίου, να αποδίδονται οι περιοχές του εδάφους με υψηλότερη πιθανότητα διάβρωσης.

Πίνακας 10. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων του συντελεστή αναγλύφου LS

Διάσταση φατνίου	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση
1	5,703	3,9282
5	8,2654	4,7568
10	9,6208	5,3109
25	11,7522	6,1864
50	13,2252	6,5938



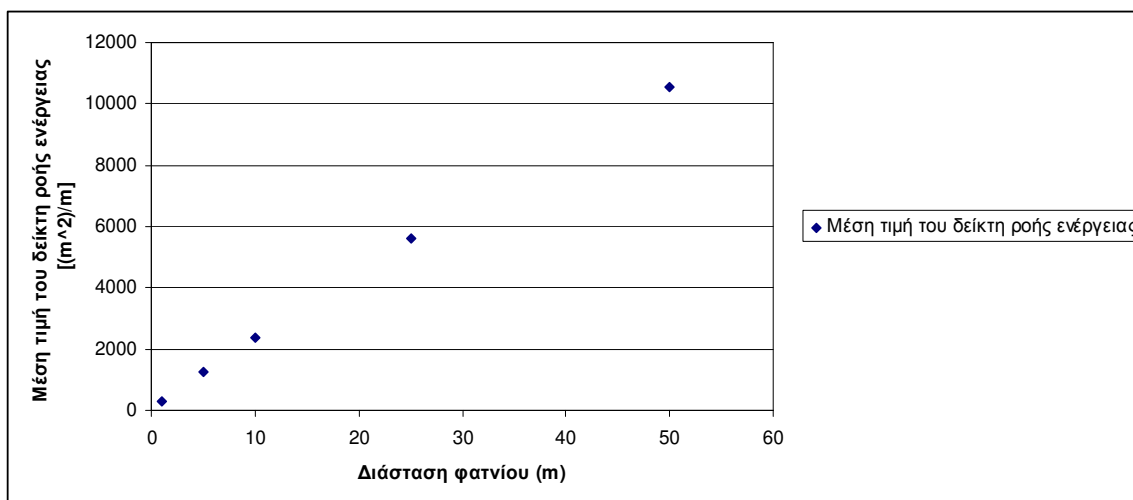
Εικόνα 26. Μέση τιμή του συντελεστή αναγλύφου LS των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσεως της χωρικής ανάλυσης

➤ **Δείκτης ροής ενέργειας**

Όσον αφορά τον δείκτη ροής ενέργειας, με τη στατιστική ανάλυση (**Πίνακας 11 & Εικόνα 27**), αναδεικνύεται ότι η μέση τιμή μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την διάσταση του φατνίου. Ανάλογη μεταβολή των δεδομένων, προέκυψε και για την συσσώρευση ροής ανά φατνίο.

Πίνακας 11. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων δείκτη ροής ενέργειας

Διάσταση φατνίου	Μέση Τιμή (m ² /m)	Τυπική απόκλιση (m ² /m)
1	269,6122	7595,3404
5	1270,6473	18759,6335
10	2382,8102	23055,5727
25	5605,6376	31355,1808
50	10571,1316	31373,8204



Εικόνα 27. Μέση τιμή του δείκτη ροής ενέργειας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

5.2. Μελέτη Επίδρασης της Χωρικής Ανάλυσης στα Γεωμορφομετρικά

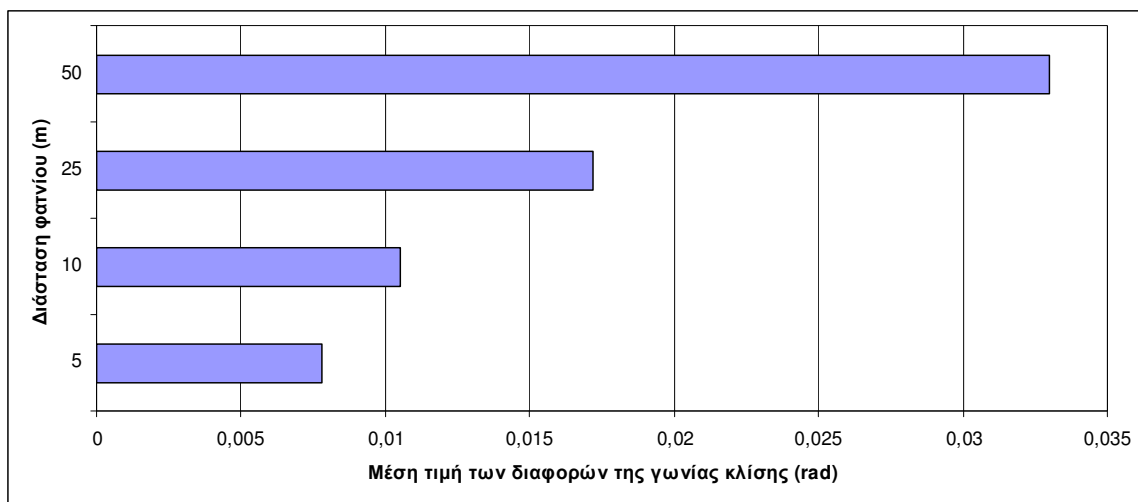
Χαρακτηριστικά

❖ Κλίση

Στο ψηφιακό μοντέλο κλίσεων, χωρικής ανάλυσης 1 m, εντοπίζονται κατά μέσο όρο υψηλότερες τιμές κλίσης στα φαντρία, σε σχέση με τα συγκρινόμενα μοντέλα κλίσεων και αυτό διαπιστώνεται από το γεγονός ότι ο μέσος όρος της διαφοράς των κλίσεων είναι θετική τιμή και ολοένα αυξανόμενη κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης (**Πίνακας 12**). Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, διότι με την αύξηση της ισοδιάστασης του καννάβου, η γήινη επιφάνεια αποδίδεται πιο ομαλοποιημένη. Παρ' όλα αυτά, οι μέσοι όροι των διαφορών της κλίσης είναι μικρής τάξεως μεγέθη και κατ' επέκταση προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο των Zevenbergen και Thorne (1987), υπολογίζει την παράμετρο της κλίσης, χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αλλαγή της διάστασης του φαντίου. Η μεγαλύτερη μέση τιμή της διαφοράς των τιμών κλίσης από το μοντέλο αναφοράς, προκύπτει για διάσταση φαντίου 50m, καθώς το μοντέλο αυτό υφίσταται την μεγαλύτερη εξομάλυνση της υψομετρικής πληροφορίας, σε σχέση με τα υπόλοιπα, υπό εξέταση μοντέλα (**Εικόνα 28**). Ωστόσο, ακόμα και στην χαμηλότερη χωρική ανάλυση, ο μέσος όρος των διαφορών της κλίσης προκύπτει της τάξεως του 3,3%, τιμή που υποδηλώνει καλή προσέγγιση των κλίσεων από το μοντέλο των 50 m, για την συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού κλίσεων, που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, βάσει των στατιστικών στοιχείων του πίνακα παρατηρείται αύξηση του εύρους των διαφορών, όσο η διάσταση του καννάβου μικραίνει, ενώ επιπλέον για διάσταση φαντίου 10 m και 25 m, η διακύμανση των διαφορών κλίσης παρουσιάζει μια σταθερότητα.

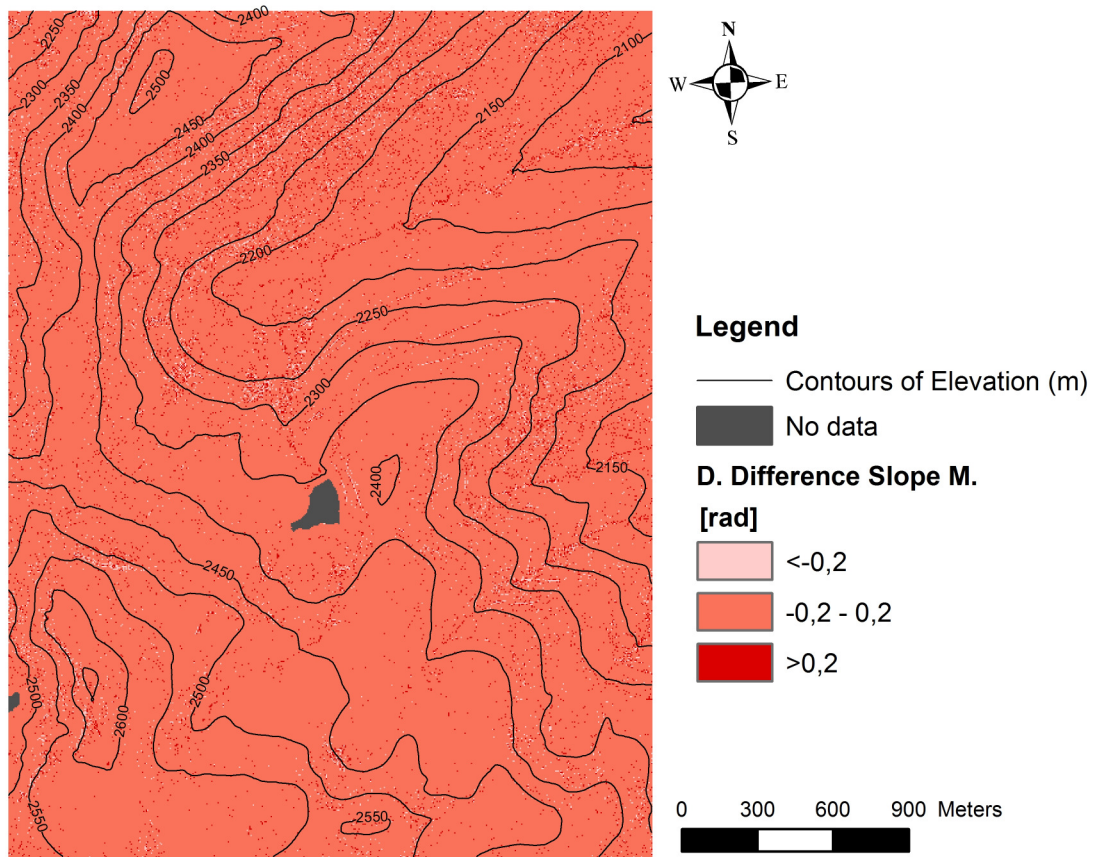
Πίνακας 12. Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών της κλίσης, του μοντέλου αναφοράς με κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Μέγεθος φατνίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς (rad)	Μέγιστη τιμή της διαφοράς (rad)	Μέσος όρος των διαφορών της γωνίας κλίσης (rad)	Τυπική απόκλιση διαφορών (rad)
5	-1,0309	0,8674	0,0078	0,0977
10	-0,6720	0,8798	0,0105	0,1034
25	-0,6546	0,8859	0,0172	0,1136
50	-0,3720	0,9129	0,0330	0,1238

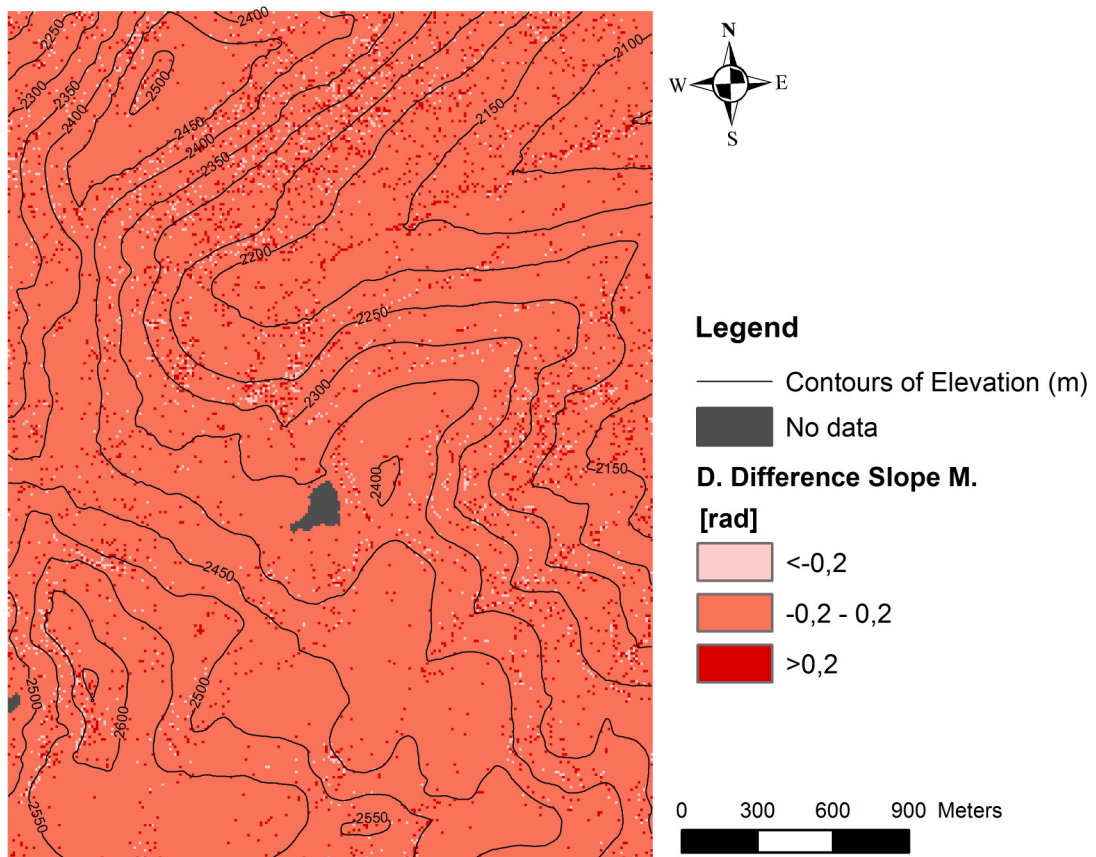


Εικόνα 28. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της γωνίας κλίσης συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

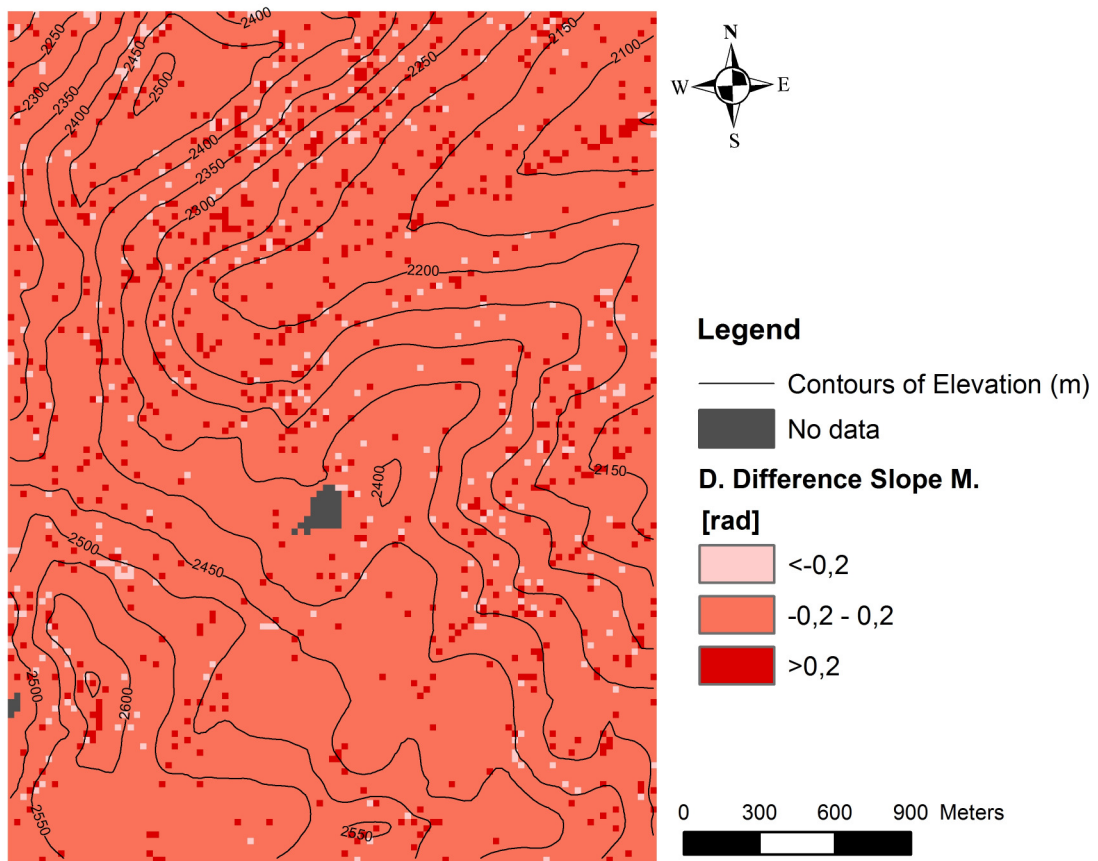
Σε κάθε περίπτωση συγκρινόμενου μοντέλου με το μοντέλο αναφοράς, οι τιμές των διαφορών για την παράμετρο της γωνίας κλίσης συγκεντρώνονται γύρω από την μέση τιμή σε ένα εύρος διαφορών γωνίας έως και 11°, ή διαφορετικά 20%. Η οπτικοποίηση των διαφορών έγινε βάσει της τάξης μεγέθους των τιμών και όπως διαπιστώνεται το χωρικό πρότυπο είναι διασκορπισμένο και επομένως δεν εξάγεται κάποιο συμπέρασμα που να συσχετίζεται με την μορφολογία της περιοχής μελέτης (**Εικόνες 29, 30, 31 & 32**).



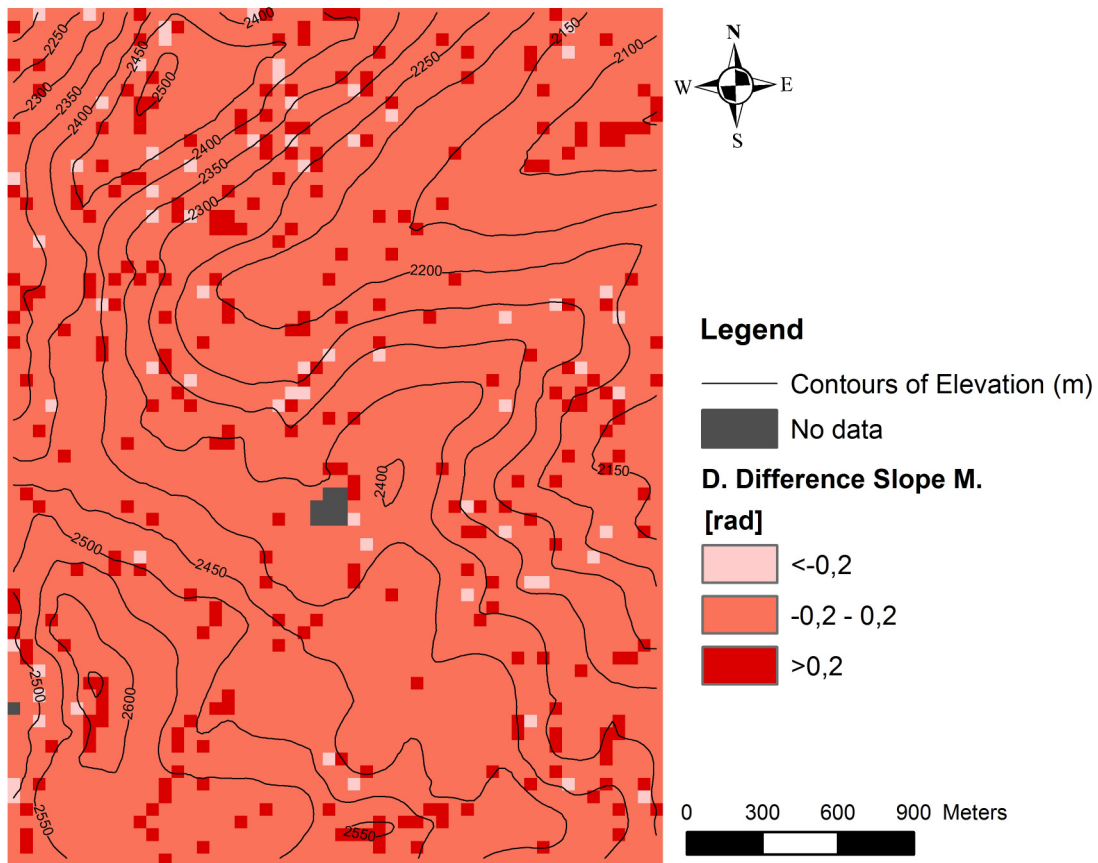
Εικόνα 29. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 30. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 31. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 32. Αναπαράσταση των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

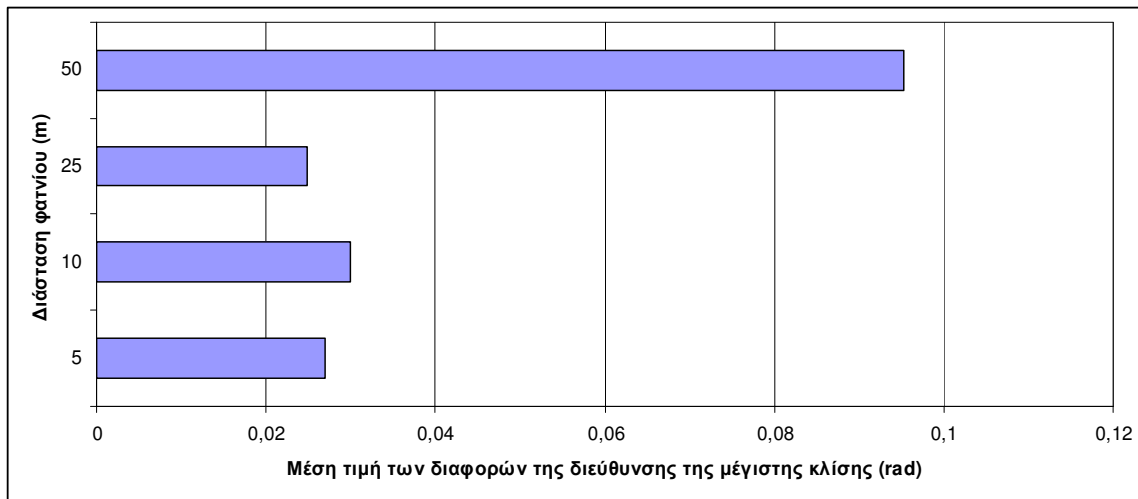
❖ Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης

Όμοια, με την παράμετρο της κλίσης, προκύπτουν μικρής τάξεως διαφορές της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης, στα ζεύγη των συγκρινόμενων μοντέλων. Αναλυτικότερα, από τον επισυναπτόμενο πίνακα στατιστικών παρατηρείται ότι για διάσταση φατνίου 5m, 10 m και 25 m, εντοπίζονται μικρές αποκλίσεις στους μέσους όρους των διαφορών (**Πίνακας 13**). Το γεγονός αυτό ερμηνεύει μία συμμετρία του παραβολοειδούς προσαρμογής των Zevenbergen και Thorne (1987) των μοντέλων ανάλυσης 5 m, 10 m και 25 m, με το μοντέλο αναφοράς. Αντιθέτως, στην διάσταση φατνίου 50 m σημειώνεται μία απότομη αύξηση του μέσου όρου της διαφοράς, για την εν λόγω παράμετρο (**Εικόνα 33**). Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφερθεί ότι η υπολογιζόμενη μέση τιμή των διαφορών προκύπτει η χαμηλότερη για την ανάλυση των 25 m, που σημαίνει ότι το μοντέλο αυτό προσεγγίζει υπολογιστικά το μοντέλο αναφοράς, πολύ περισσότερο από τα υπόλοιπα μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων, για την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Τέλος, επισημαίνεται ότι η διακύμανση των διαφορών της κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης εμφανίζει μία σταθερότητα, σε κάθε περίπτωση συγκρινόμενου μοντέλου, ενώ

επιπλέον παρατηρείται μια γραμμική μεταβολή των τυπικών αποκλίσεων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.

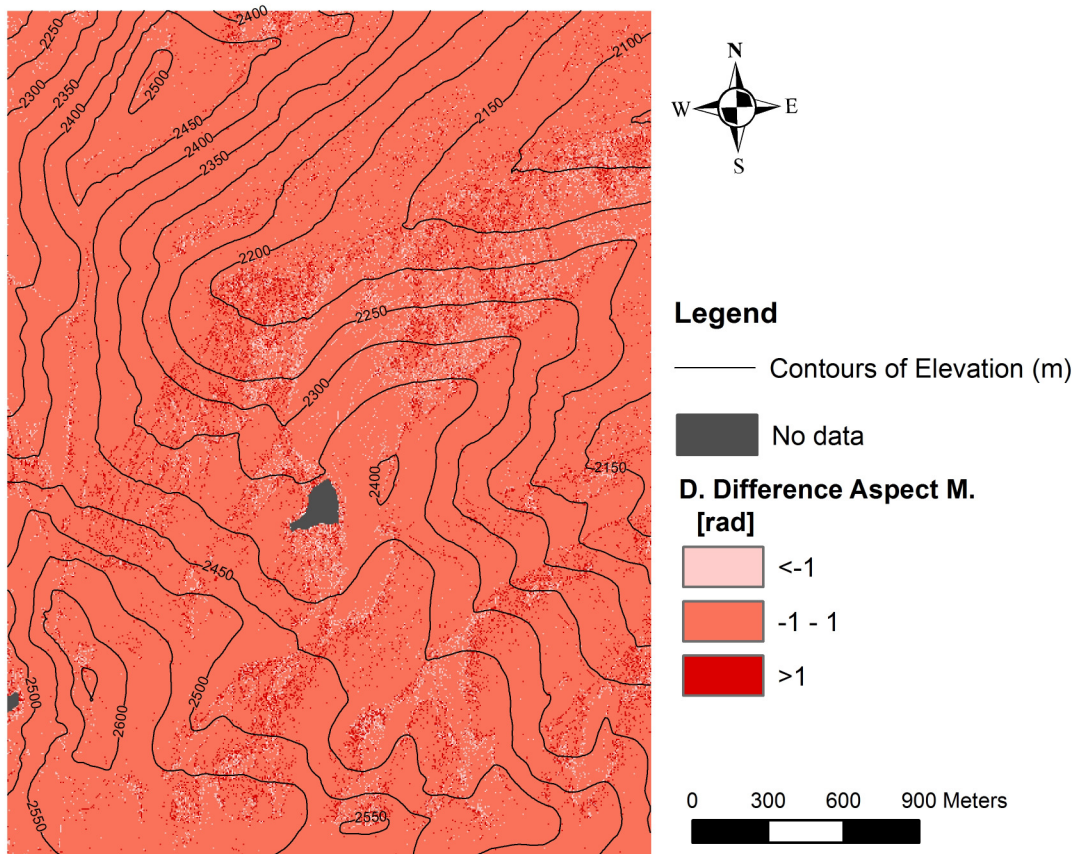
Πίνακας 13. Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των διευθύνσεων μέγιστης κλίσης (προσανατολισμός), του μοντέλου αναφοράς με κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους, διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

Μέγεθος φαντίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς (rad)	Μέγιστη τιμή της διαφοράς (rad)	Μέσος όρος των διαφορών του προσανατολισμού (rad)	Μέσος όρος των διαφορών του προσανατολισμού (degrees)	Τυπική απόκλιση διαφορών (rad)
5	-6,2824	6,2809	0,0270	1,5470	1,4913
10	-6,2712	6,2791	0,0299	1,7131	1,5521
25	-6,2591	6,2650	0,0249	1,4267	1,6253
50	-6,2314	6,2709	0,0953	5,4603	1,7957

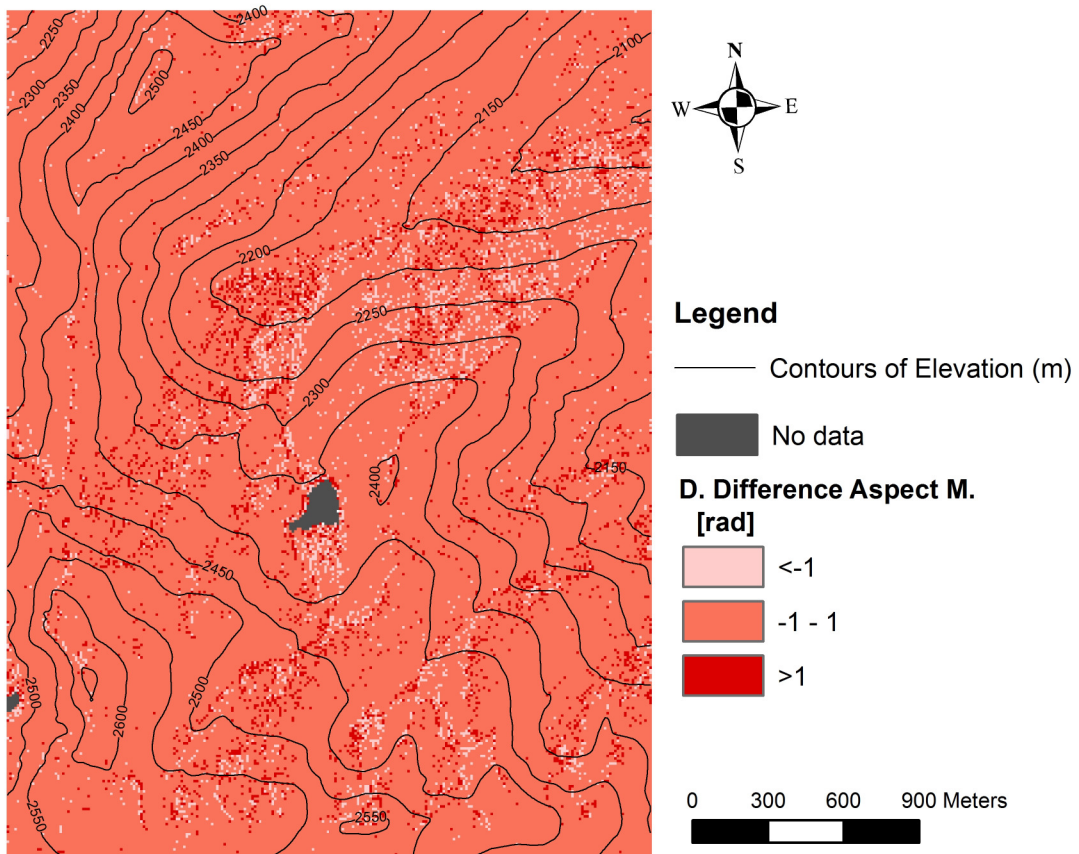


Εικόνα 33. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

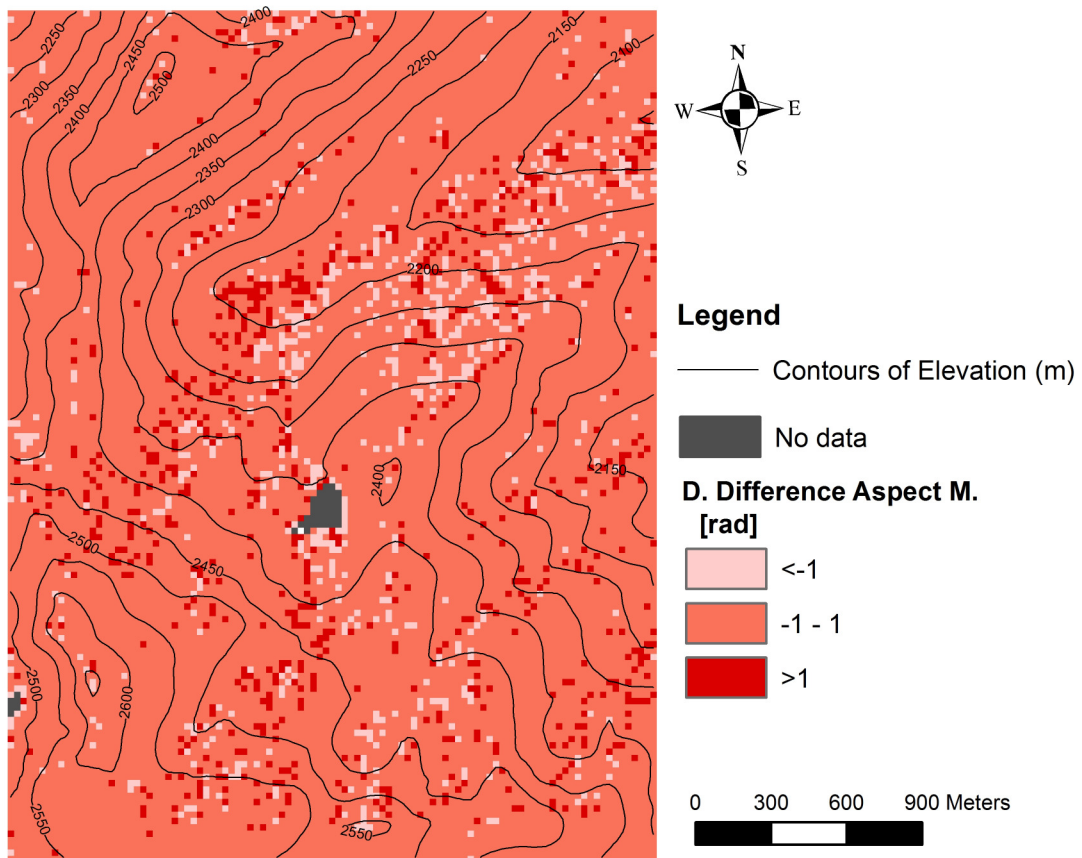
Στους χάρτες που ακολουθούν (**Εικόνες 34, 35, 36 & 37**) προβάλλεται η χωρική κατανομή των διαφορών της διεύθυνσης κλίσης για κάθε συγκριτική αξιολόγηση. Παρά το γεγονός ότι οι μέσες τιμές των διαφορών υποδεικνύουν σχετική ανεξαρτησία του χαρακτηριστικού από την επιλογή της διάστασης του καννάβου, στην οπτικοποίηση των διαφορών παρατηρείται μία σημαντική επίδραση της κλίμακας σε ορισμένες περιοχές. Η αφαίρεση της τοπικής λεπτομέρειας κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης, αυξάνει τις τιμές των διαφορών, ειδικότερα στις πλαγιές με βορειοδυτική κατεύθυνση. Αυτό υποδεικνύεται από τις οπτικοποιήσεις και έχει ως αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται ένα ρεαλιστικό πρότυπο της παραμέτρου για τις εν λόγω περιοχές, στην ανάλυση με την αραιότερη ισοδιάσταση (**Εικόνες 36 & 37**). Επιπροσθέτως, σε κάθε μοντέλο απεικόνισης των διαφορών, σημειώνεται μία συγκέντρωση των τιμών στην τάξη μεγέθους έως και 1 rad, για το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης.



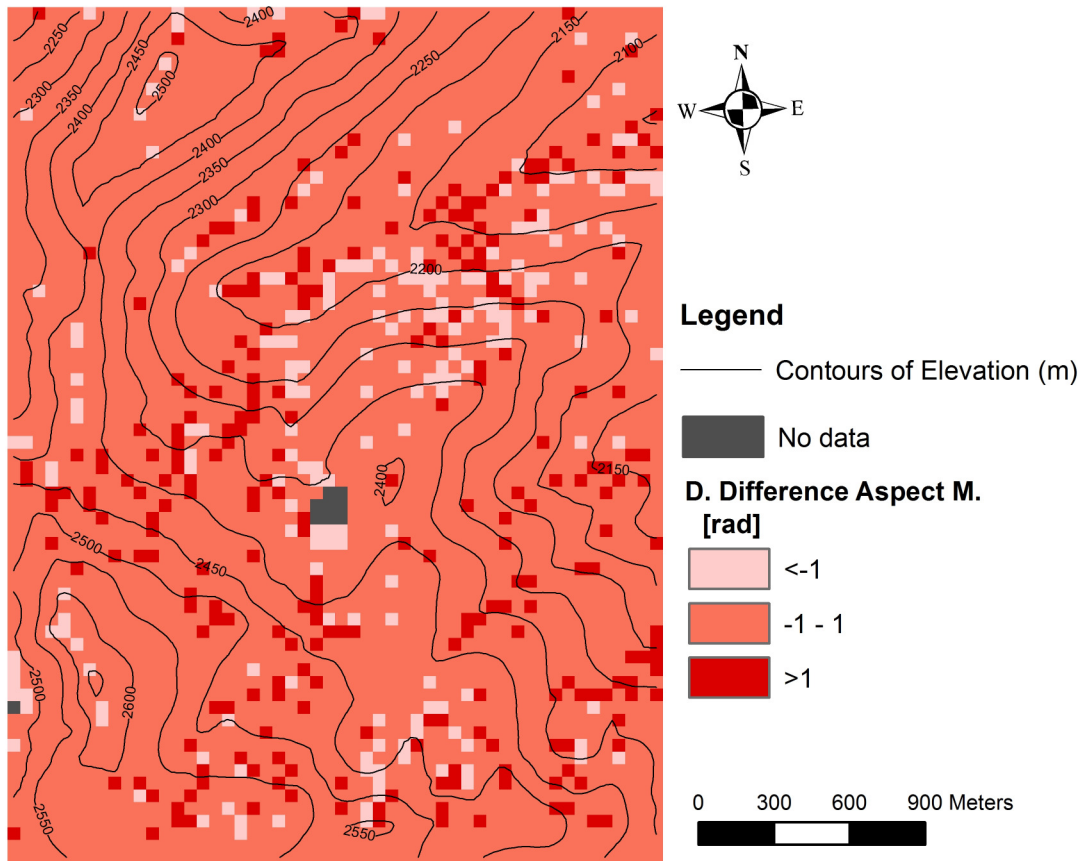
Εικόνα 34. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 35. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 36. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 37. Αναπαράσταση των διαφορών διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

❖ Καμπυλότητες

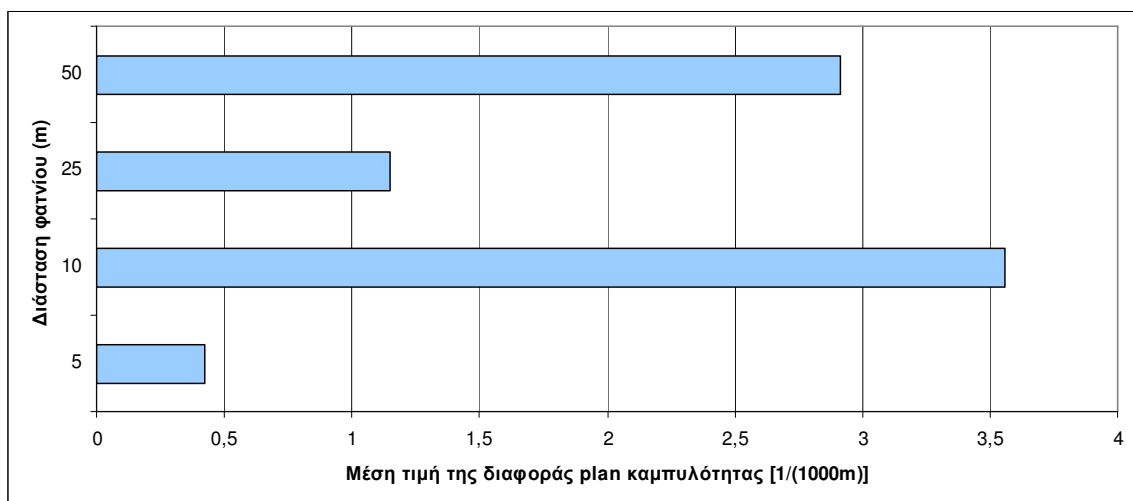
Στις συνιστώσες της καμπυλότητας, τα στατιστικά στοιχεία δεν εμφανίζουν την ίδια συστηματική συμπεριφορά, όπως στις περιπτώσεις της κλίσης και της μέγιστης διεύθυνσης κλίσης, όπου η μείωση της χωρικής ανάλυσης αυξάνει την μέση τιμή της διαφοράς. Η επισήμανση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μέσοι όροι των διαφορών των καμπυλοτήτων έχουν πολύ μικρές τιμές και πρακτικά η όποια διαφορά δεν κρίνεται σκόπιμο να σχολιαστεί περαιτέρω (*Εικόνες 38 & 39*). Η μικρή τυπική απόκλιση σε κάθε διαδικασία σύγκρισης υποδηλώνει μικρή διασπορά των τιμών γύρω από τον μέσο όρο, κάτι το οποίο αποδίδεται και στα ιστογράμματα των διαφορών των καμπυλοτήτων (*Πίνακες 14 & 15* και *Εικόνες 40 & 41*). Τέλος, όσο η χωρική ανάλυση του συγκρινόμενου μοντέλου μειώνεται, τόσο το εύρος των τιμών της διαφοράς μικραίνει και το γεγονός αυτό δικαιολογείται από το ότι η διαβάθμιση των τιμών της καμπυλότητας στο μοντέλο μικραίνει, καθώς αυξάνεται το μέγεθος του φατνίου.

Πίνακας 14. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

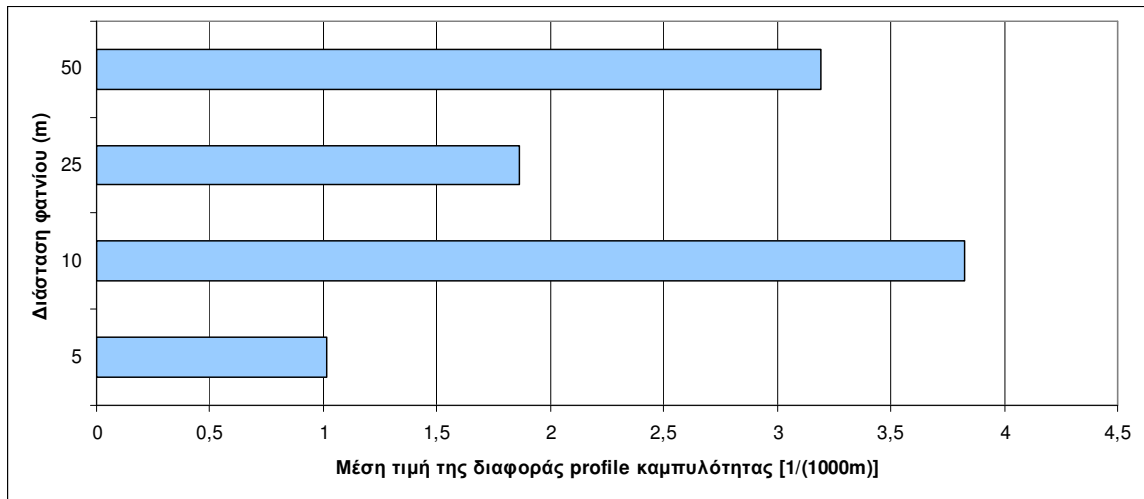
Μέγεθος φατνίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς (1/m)	Μέγιστη τιμή της διαφοράς (1/m)	Μέση τιμή διαφορών της plan καμπυλότητας [1/(1000m)]	Τυπική απόκλιση διαφορών (1/m)
5	-9,2555	6,4879	0,4256	0,2061
10	-6,8108	6,9199	3,5617	0,2089
25	-2,5473	6,5155	1,1507	0,2138
50	-2,5482	2,2849	2,9156	0,2103

Πίνακας 15. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

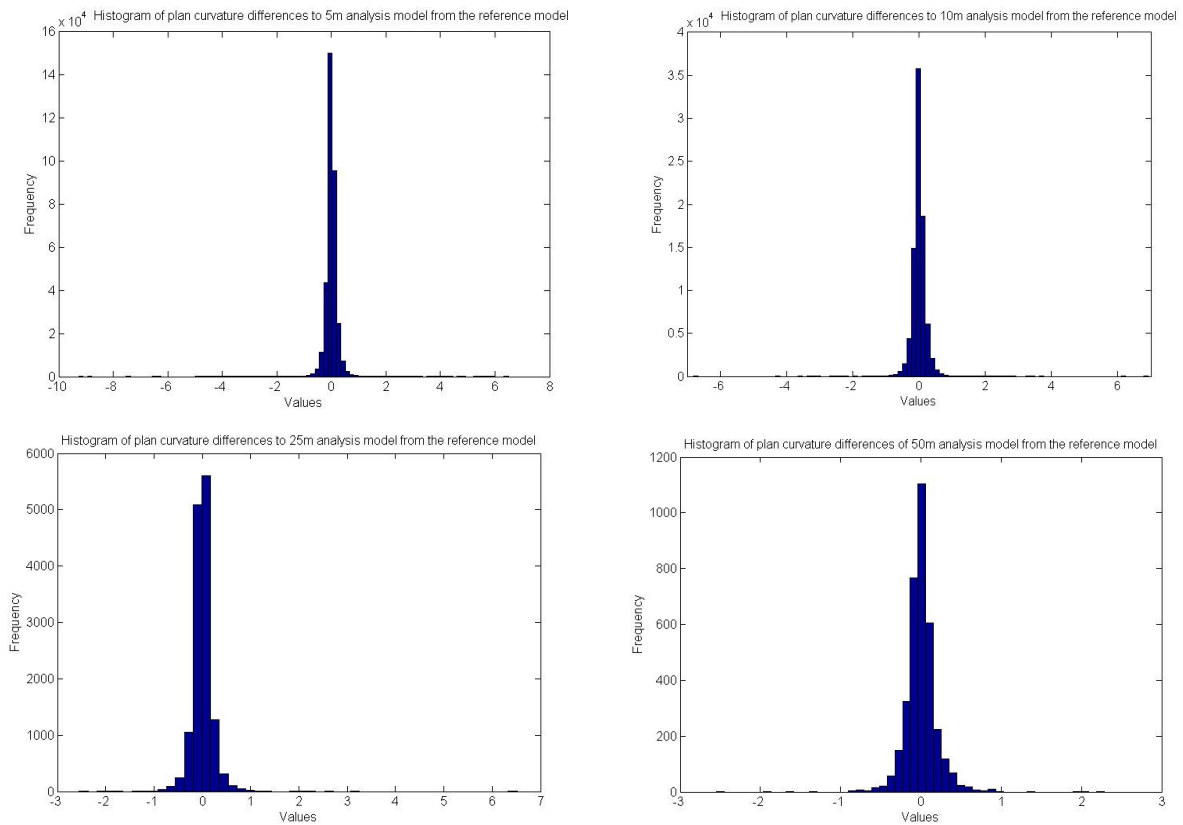
Μέγεθος φατνίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς (1/m)	Μέγιστη τιμή της διαφοράς (1/m)	Μέση τιμή διαφορών της profile καμπυλότητας 1/(1000m)]	Τυπική απόκλιση διαφορών (1/m)
5	-17,9770	10,7781	1,0155	0,2945
10	-6,3679	8,8891	3,8258	0,2921
25	-5,9078	11,1562	1,8658	0,3065
50	-5,8787	2,1933	3,1942	0,2901



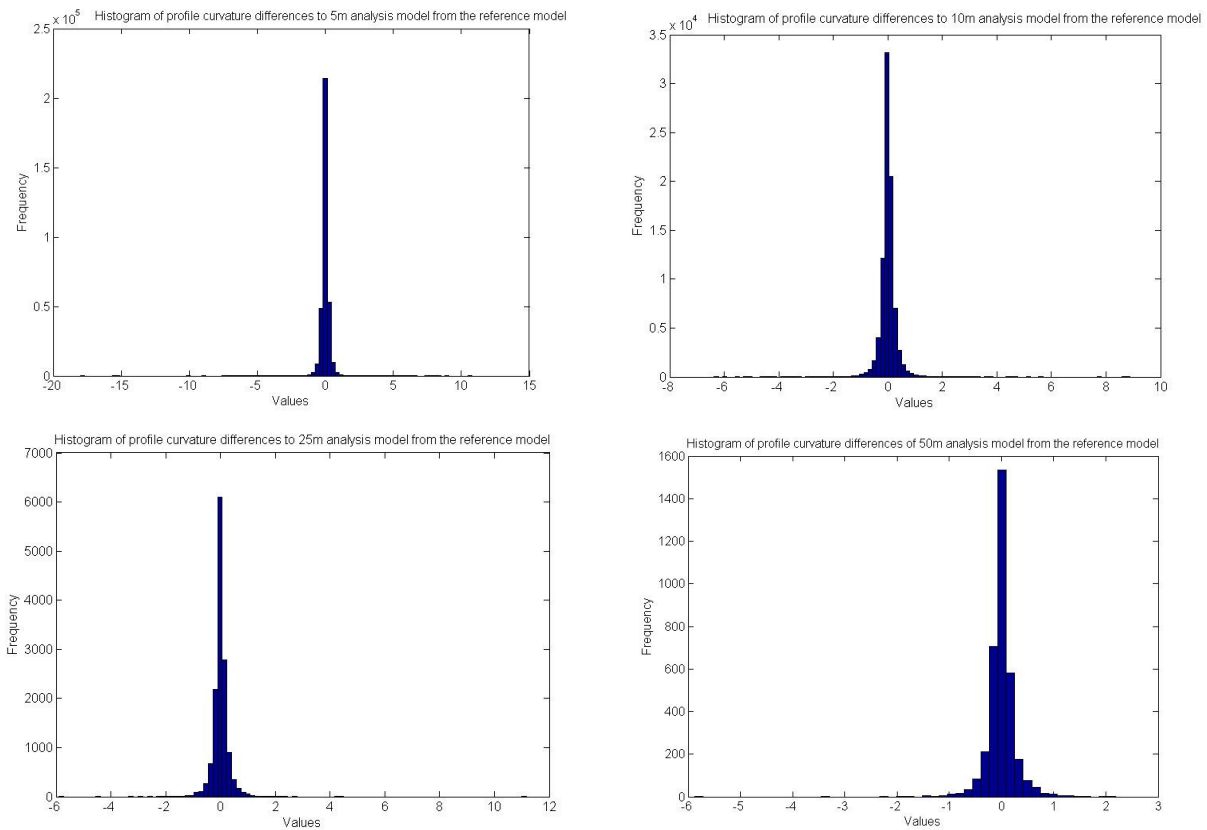
Εικόνα 38. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



Εικόνα 39. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



Εικόνα 40. Ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων των διαφορών της καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, των συγκρινόμενων μοντέλων



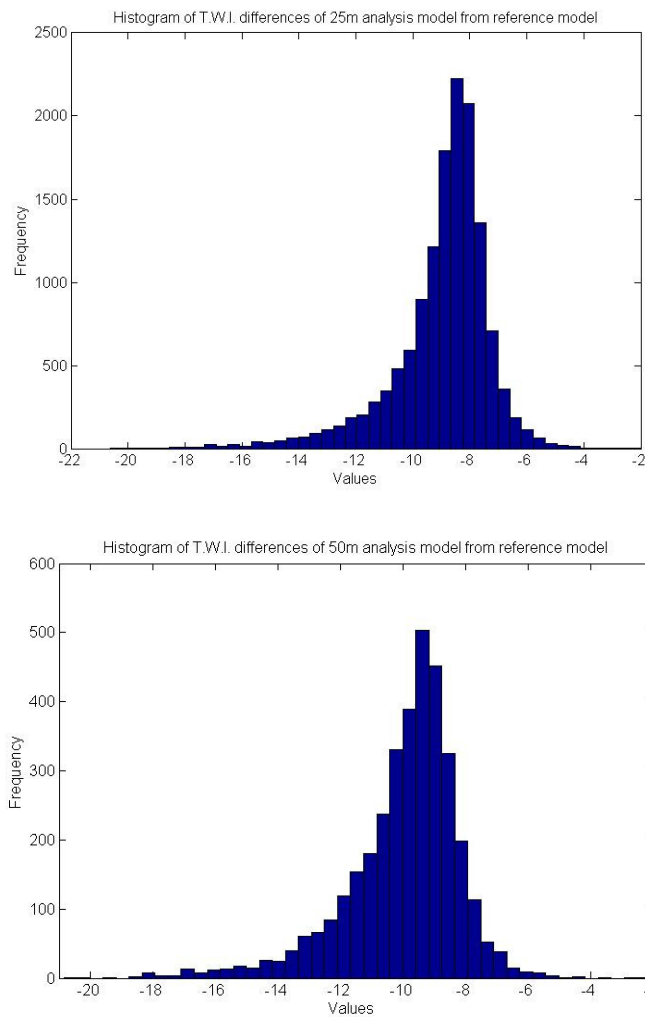
Εικόνα 41. Ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων των διαφορών της καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, των συγκρινόμενων μοντέλων

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος των Zevenbergen & Thorne (1987), υπολογίζει τις εν λόγω παραμέτρους χωρίς να δημιουργεί σημαντικές αποκλίσεις των τιμών, κατά την αλλαγή της χωρικής ανάλυσης.

❖ Τοπογραφικός δείκτης υγρασίας

Από την καταγραφή των στατιστικών στοιχείων της κάθε συγκριτικής διαδικασίας, διαπιστώνεται ότι η μείωση της χωρικής ανάλυσης επιφέρει αφενός σταδιακή αύξηση της μέσης τιμής των διαφορών του δείκτη κατ' απόλυτη τιμή και αφετέρου ελάττωση της μέγιστης τιμής της διαφοράς (**Πίνακας 16**). Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όπως επισημάνθηκε σε προγενέστερη ανάλυση του δείκτη, η αύξηση της διάστασης του φατίου στην ψηφιδωτή μορφή του μοντέλου, υπερεκτιμά τις υπολογιζόμενες τιμές. Η διακύμανση των διαφορών του δείκτη στα μοντέλα 5 m και 10m ανάλυσης, εμπεριέχει θετικές και αρνητικές τιμές, σε αντίθεση με τα μοντέλα ανάλυσης 25 m και 50 m, όπου το εύρος των διαφορών περιλαμβάνει αποκλειστικά και μόνο αρνητικές τιμές (**Εικόνα 42**). Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή της χωρικής ανάλυσης των 25m και 50 m, για την αναπαράσταση του δείκτη, θα δημιουργεί ένα μοντέλο όπου σε όλη την επιφάνεια του υπερεκτιμά τις τιμές του δείκτη και κατ' επέκταση δεν προβάλλει ρεαλιστικά την υφιστάμενη κατάσταση στην περιοχή μελέτης. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι η υπερεκτίμηση του δείκτη στα αραιότερης ισοδιάστασης

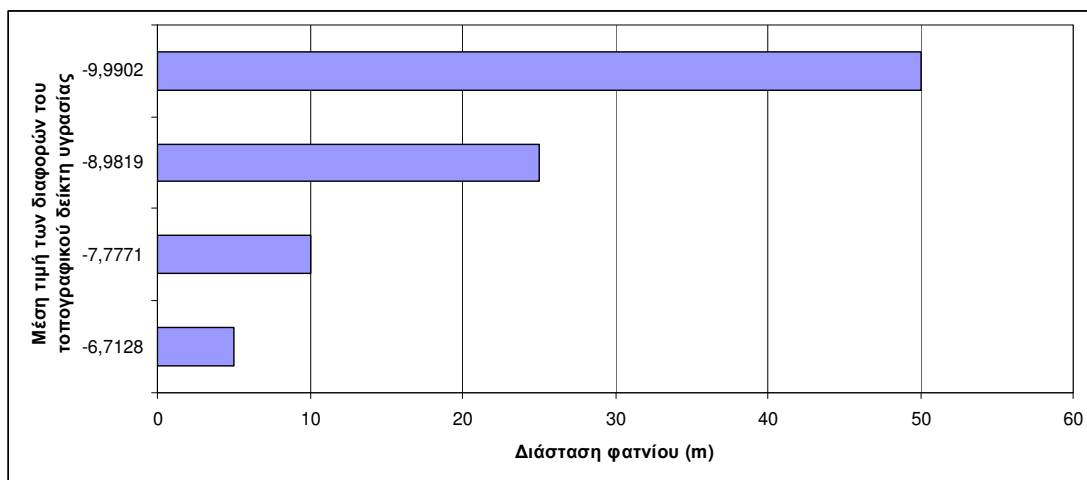
ΨΜΥ, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα προβλήματα αναπαράστασης της κατεύθυνσης ροής. Εξάλλου, στον προσδιορισμό του δείκτη υπεισέρχεται ως παράμετρος υπολογισμού η συσσώρευση ροής.



Εικόνα 42. Ιστογράμματα κατανομής συχνότητας των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας των μοντέλων ανάλυσης 25 m και 50 m, από το μοντέλο αναφοράς

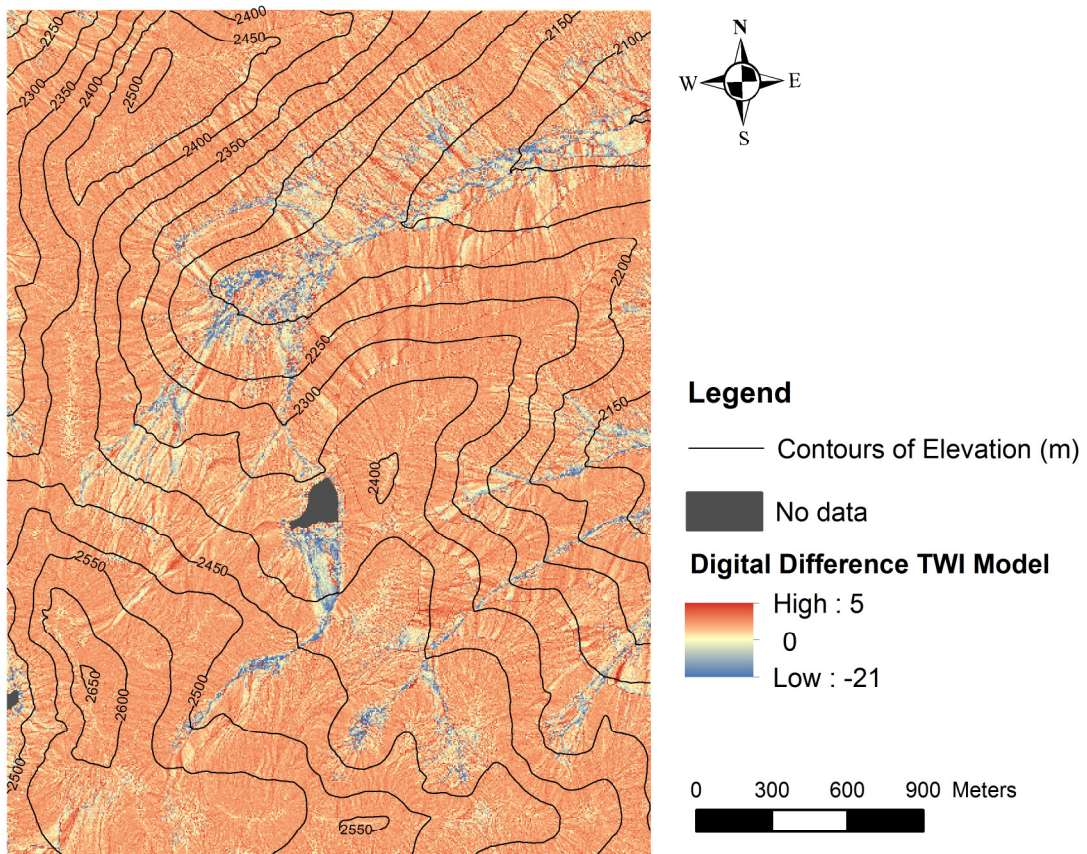
Πίνακας 16. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του τοπογραφικού δείκτη, για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

Μέγεθος φατινίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς	Μέγιστη τιμή της διαφοράς	Μέση τιμή διαφορών του τοπογραφικού δείκτη	Τυπική απόκλιση διαφορών
5	-21,0396	5,1380	-6,7128	1,3696
10	-20,5821	0,6548	-7,7771	1,5915
25	-20,6187	-1,844	-8,9819	1,7598
50	-20,8416	-2,3982	-9,9902	1,8442

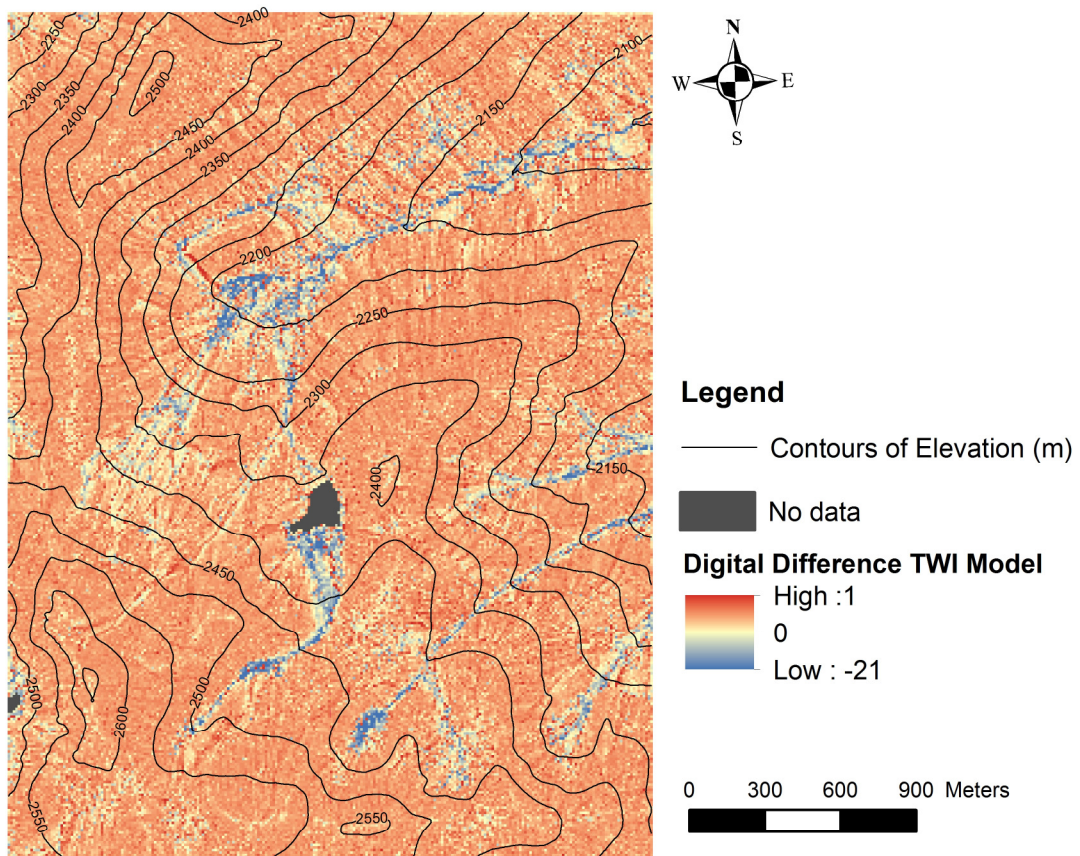


Εικόνα 43. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

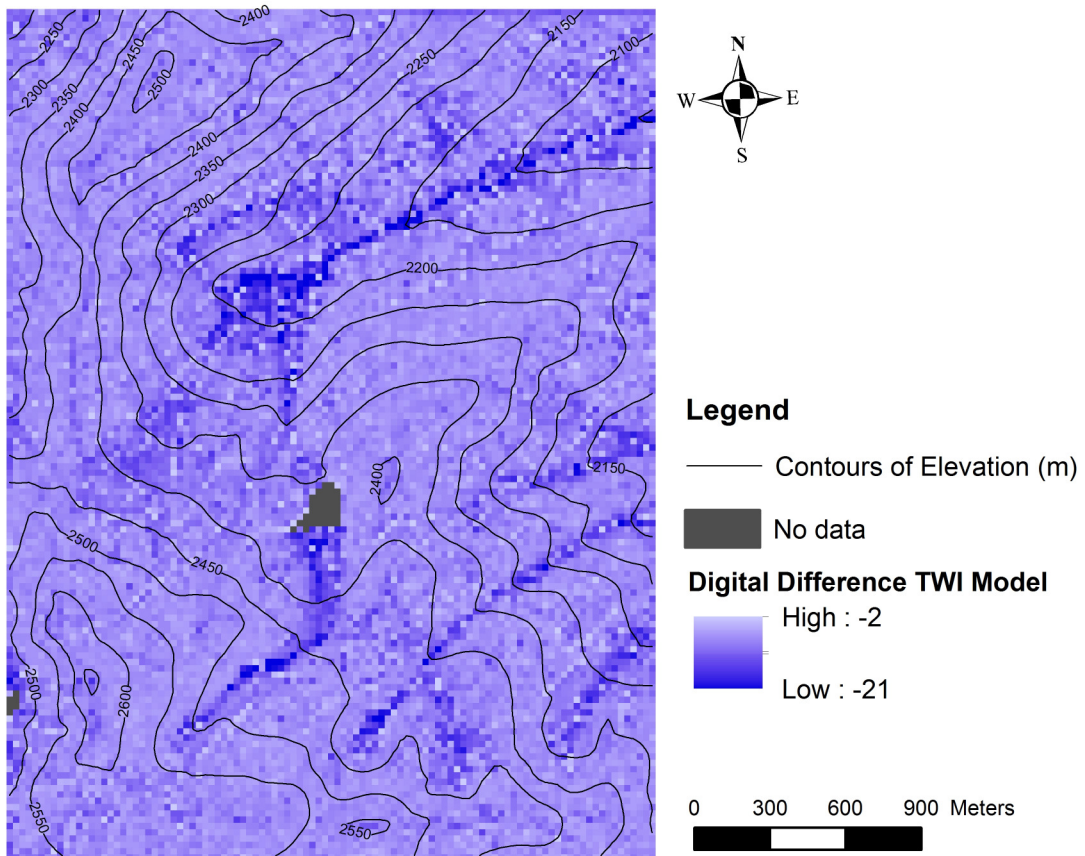
Στην συνέχεια, γίνεται η αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη, βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, για κάθε ζεύγος μοντέλων σύγκρισης. Όπως είναι προφανές από τις οπτικοποιήσεις, η τοπογραφική θέση έχει μεγάλο αντίκτυπο στην διαμόρφωση των τιμών του δείκτη υγρασίας. Στην σύγκριση του μοντέλου αναφοράς με την διάσταση φατνίου των 5 m και των 10 m, δημιουργούνται θετικές διαφορές, σε περιοχές όπου το ανάγλυφο είναι πιο έντονο, γεγονός που ερμηνεύει υποεκτίμηση του δείκτη στις πιο απότομες κλίσεις. Αντιθέτως, στις μισγάγγειες και σε πιο ομαλού αναγλύφου περιοχές, εγγύς των ρεμάτων, εντοπίζονται αρνητικές τιμές των διαφορών και έτσι ο δείκτης υπερεκτιμάται σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Στα μοντέλα χωρικών αναλύσεων 25m και 50 m, οι τιμές του δείκτη υπερεκτιμώνται σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου. Ειδικότερα, διαπιστώνεται ότι κατά την μετακίνηση από τις περιοχές υψηλότερου υψομέτρου προς τις πεδινές περιοχές, κοντά στην κοίτη του υδατορεύματος, δημιουργείται σταδιακή αύξηση των τιμών της διαφοράς του δείκτη (*Εικόνες 44, 45, 46 & 47*).



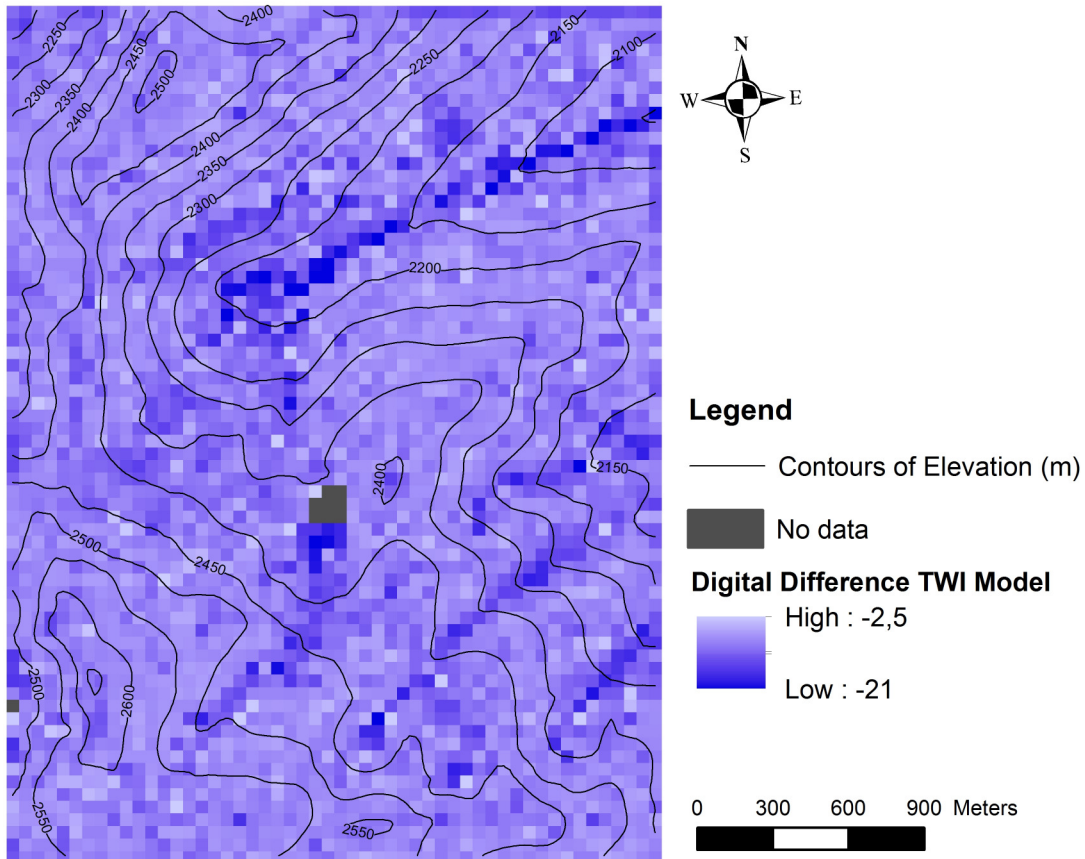
Εικόνα 44. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 45. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 46. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



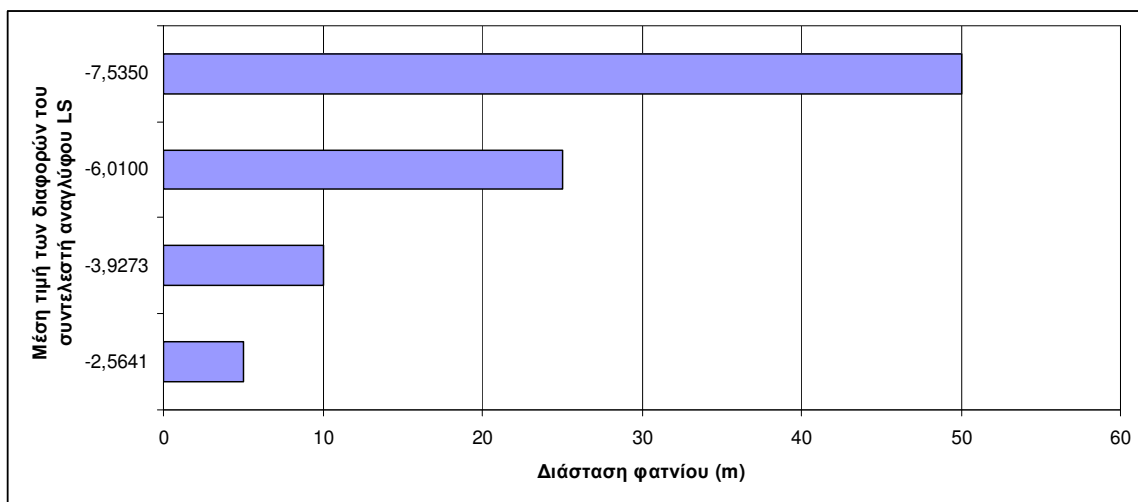
Εικόνα 47. Αναπαράσταση των διαφορών του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

❖ Συντελεστής αναγλύφου

Η αρνητική αύξηση του μέσου όρου των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου, καθώς επίσης και η μείωση του εύρους των διαφορών, είναι αναμενόμενα αποτελέσματα διότι όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αύξηση του μεγέθους του φατνίου επιφέρει αύξηση των τιμών του συντελεστή. Γενικότερα, η μείωση της χωρικής ανάλυσης προκαλεί αύξηση του παράγοντα μήκους L (Length Factor), ενώ παράλληλα παρά το γεγονός ότι οι κλίσεις εξομαλύνονται, ο παράγοντας κλίσης S (Slope Factor) δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή. Για τον λόγο αυτό η μέγιστη τιμή του μέσου όρου των διαφορών εμφανίζεται στην διάσταση φατνίου 50m, όπου το μήκος κλίσης (Length Factor), αυξάνεται ενώ ταυτοχρόνως ο βαθμός της κλίσης επηρεάζεται σε μικρό βαθμό, όπως υπέδειξε και η παραπάνω ανάλυση στην παράμετρο της κλίσης (*Πίνακας 17 & Εικόνα 48*).

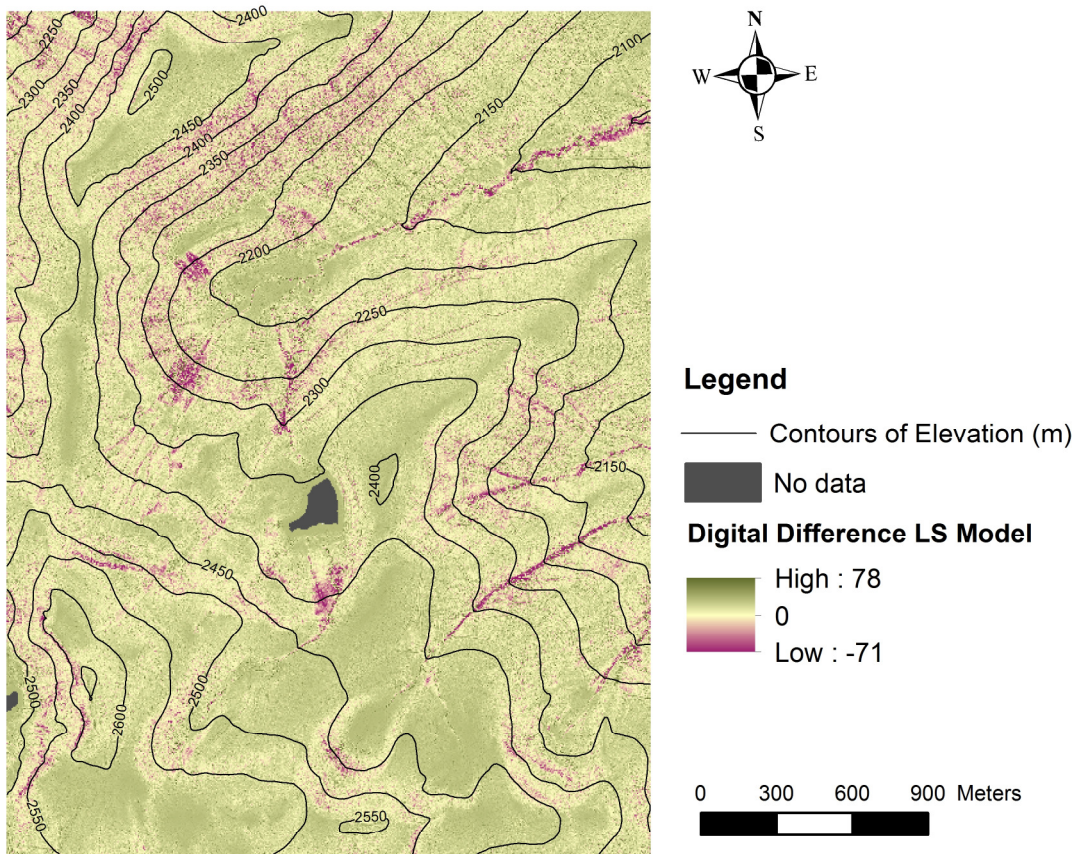
Πίνακας 17. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του συντελεστή αναγλύφου για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

Μέγεθος φατνίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς	Μέγιστη τιμή της διαφοράς	Μέσος όρος των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου	Τυπική απόκλιση διαφορών
5	-71,2169	78,4241	-2,5641	2,9240
10	-49,0958	89,4651	-3,9273	3,4990
25	-37,3451	90,2230	-6,0100	4,3919
50	-27,8040	19,6769	-7,5350	4,8847

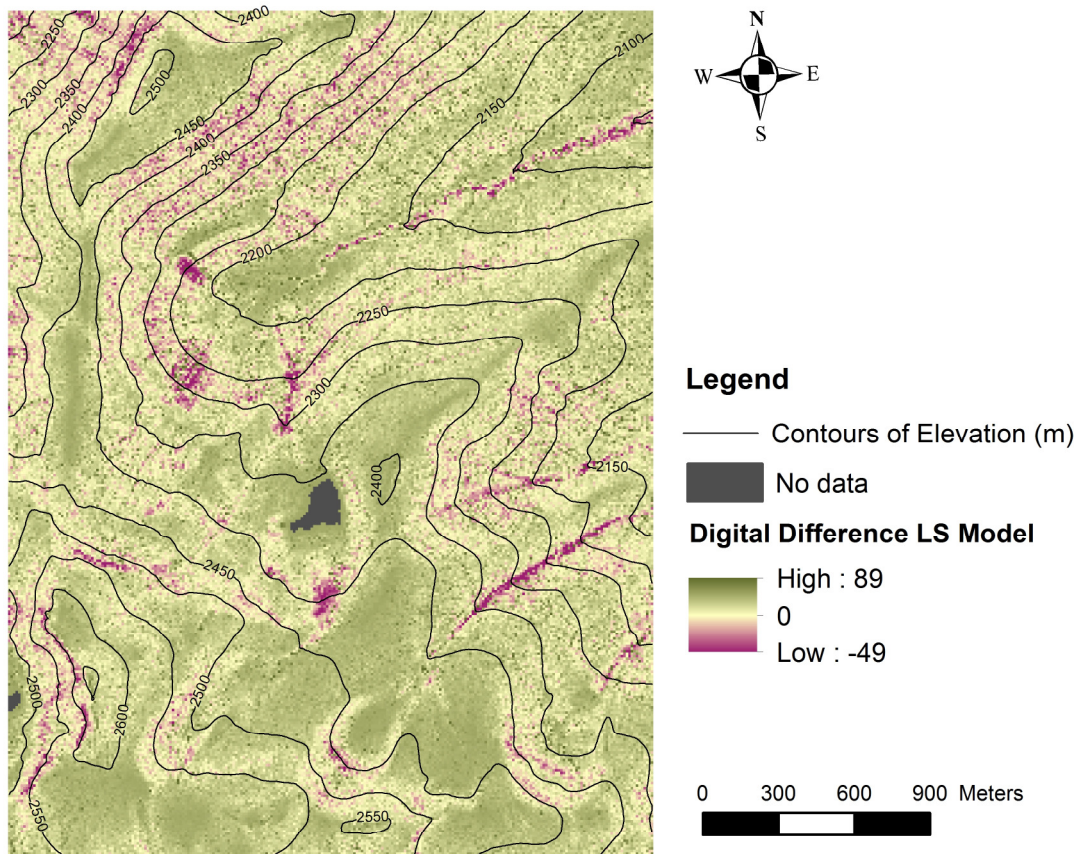


Εικόνα 48. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του δείκτη αναγλύφου, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

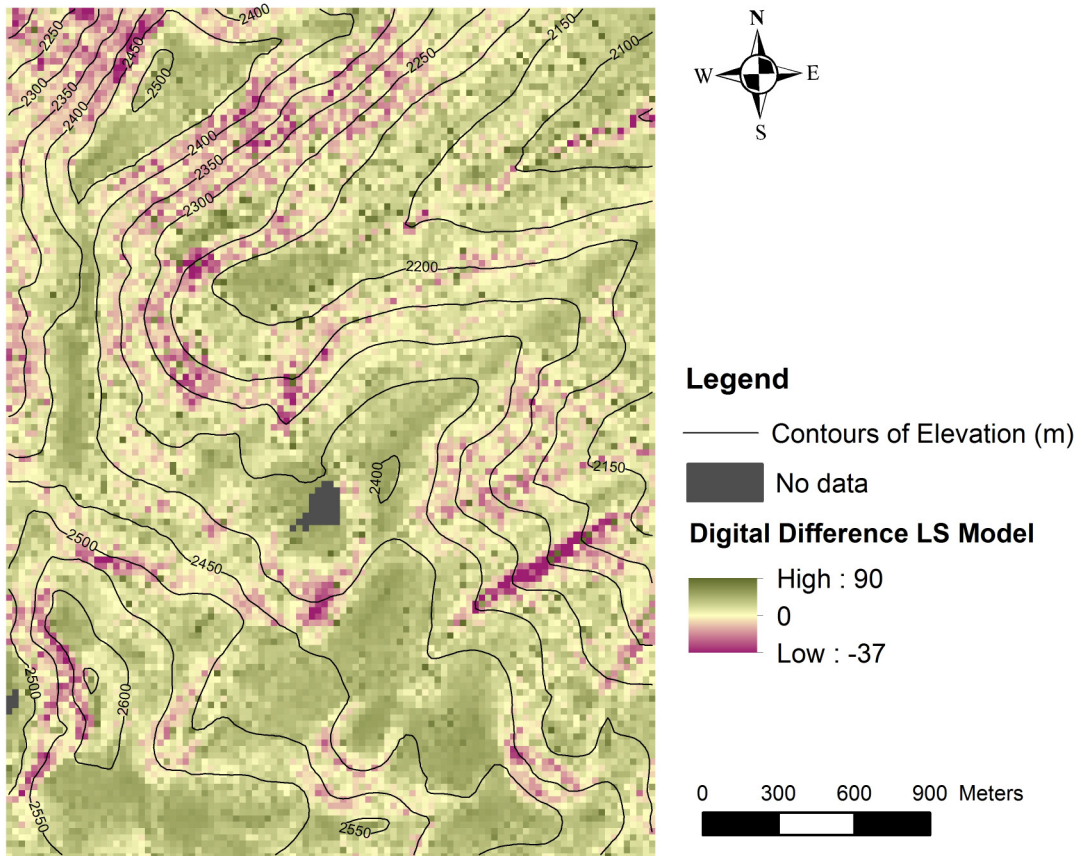
Οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης του κάθε μοντέλου με το μοντέλο αναφοράς, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα που συσχετίζουν τις διαφορές των τιμών του συντελεστή, με την μορφολογία της περιοχής (**Εικόνες 49, 50, 51 & 52**). Στις αραιότερες αναλύσεις και ειδικότερα σε περιοχές έντονων αλλαγών κλίσης εντοπίζονται μηδενικές ή αρνητικές τιμές του συντελεστή, που σημαίνει ότι στις περιοχές αυτές ο συντελεστής αναγλύφου ταυτίζεται ή υπερεκτιμάται σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Επίσης, παρατηρείται ότι οι υψηλότερες αρνητικές τιμές των διαφορών εμφανίζονται σε σημεία όπου υφίστανται μισγάγγειες. Αντιθέτως σε πιο ήπιες κλίσεις φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή υποεκτιμώνται σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς, το οποίο αποδίδει υψηλότερες τιμές. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν και για τις τέσσερις περιπτώσεις συγκρινόμενων μοντέλων, με πιο εμφανή αποτελέσματα στην σύγκριση του μοντέλου ανάλυσης 5 m, με το μοντέλο αναφοράς.



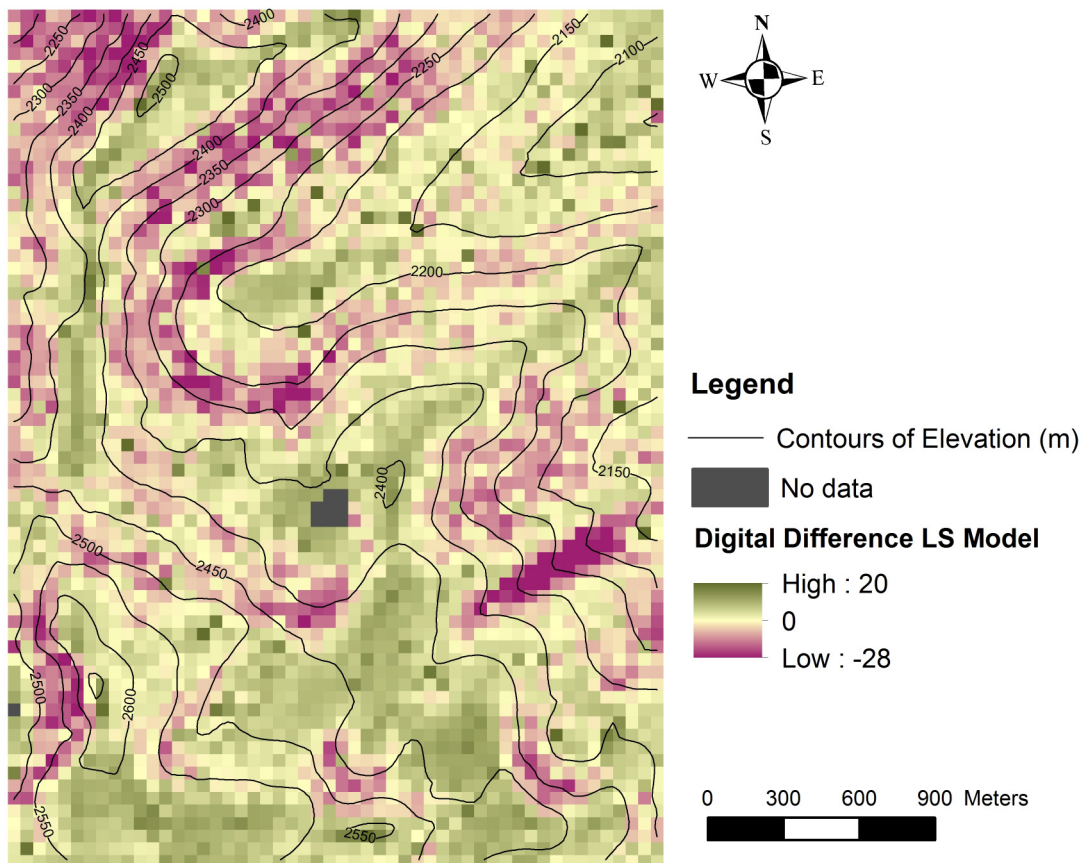
Εικόνα 49. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 50. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 51. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 52. Αναπαράσταση των διαφορών του συντελεστή αναγλύφου του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

❖ Δείκτης ροής ενέργειας

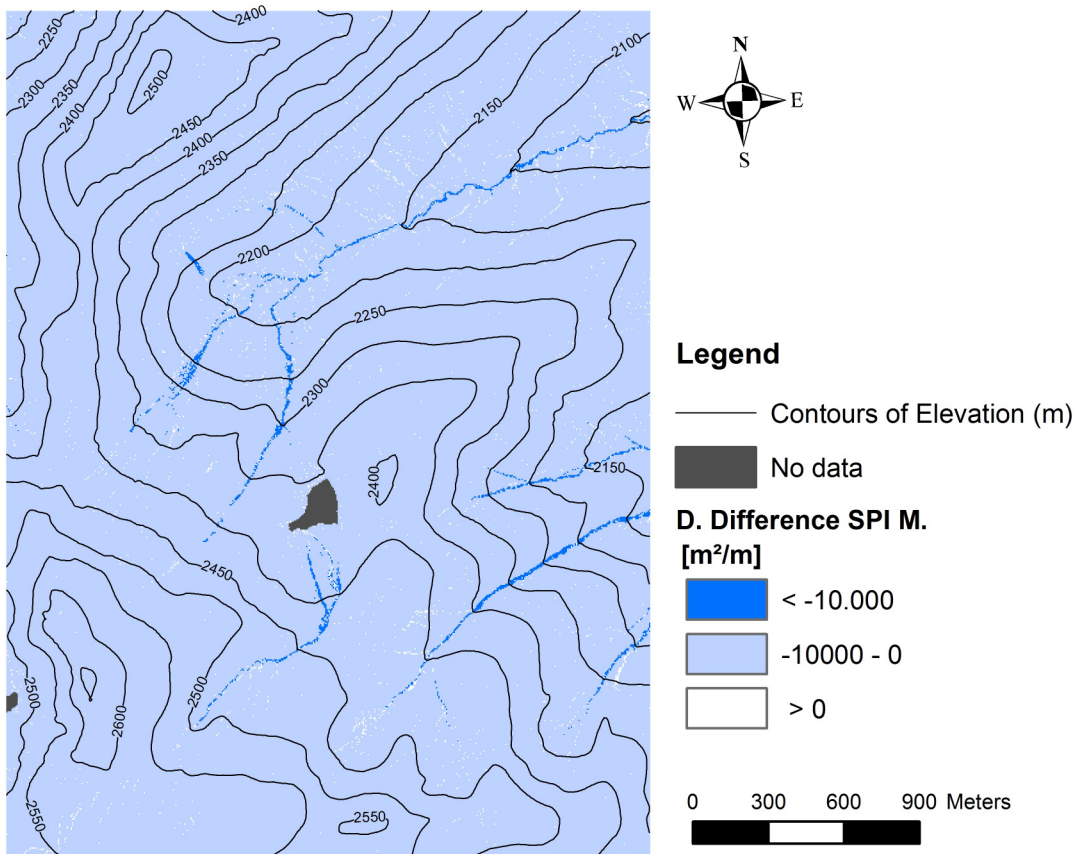
Ο δείκτης ροής ενέργειας επηρεάζεται από την επιλογή της χωρικής κλίμακας, καθώς οι τιμές του είναι άμεσα συνδεδεμένες με την συσσώρευση ροής. Η διαπίστωση αυτή είναι προβλεπόμενη, καθώς η τιμή του δείκτη ανά φατνίο είναι ανάλογη της συσσώρευσης ροής σε αυτό. Ο μέσος όρος των διαφορών του δείκτη αυξάνεται κατ' απόλυτη τιμή, καθώς μειώνεται η χωρική ανάλυση του συγκρινόμενου μοντέλου, και μάλιστα παρατηρείται μια γραμμική συσχέτιση της μεταβολής του μέσου όρου, συναρτήσει της ανάλυσης (*Πίνακα 18 & Εικόνα 53*). Όπως επισημάνθηκε, κατά τη μείωση της χωρικής ανάλυσης δημιουργείται η τάση στο μοντέλο να υπολογίζονται αυξημένοι όγκοι επιφανειακής απορροής. Η επισημανση αυτή διαπιστώνεται από τις οπτικοποιήσεις των διαφορών με πιο εμφανή τα αποτελέσματα στην σύγκριση με την χαμηλότερη ανάλυση. Οι μεγαλύτερες αρνητικές διαφορές εμφανίζονται στις μισγάγγειες της περιοχής για όλα τα συγκρινόμενα μοντέλα και συγκεκριμένα για τις αναλύσεις των 25 m και των 50 m, οι περιοχές υπερεκτίμησης του δείκτη σταδιακά αυξάνονται (*Εικόνες 54, 55, 56 & 57*).

Πίνακας 18. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των τιμών του δείκτη ροής ενέργειας για κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης

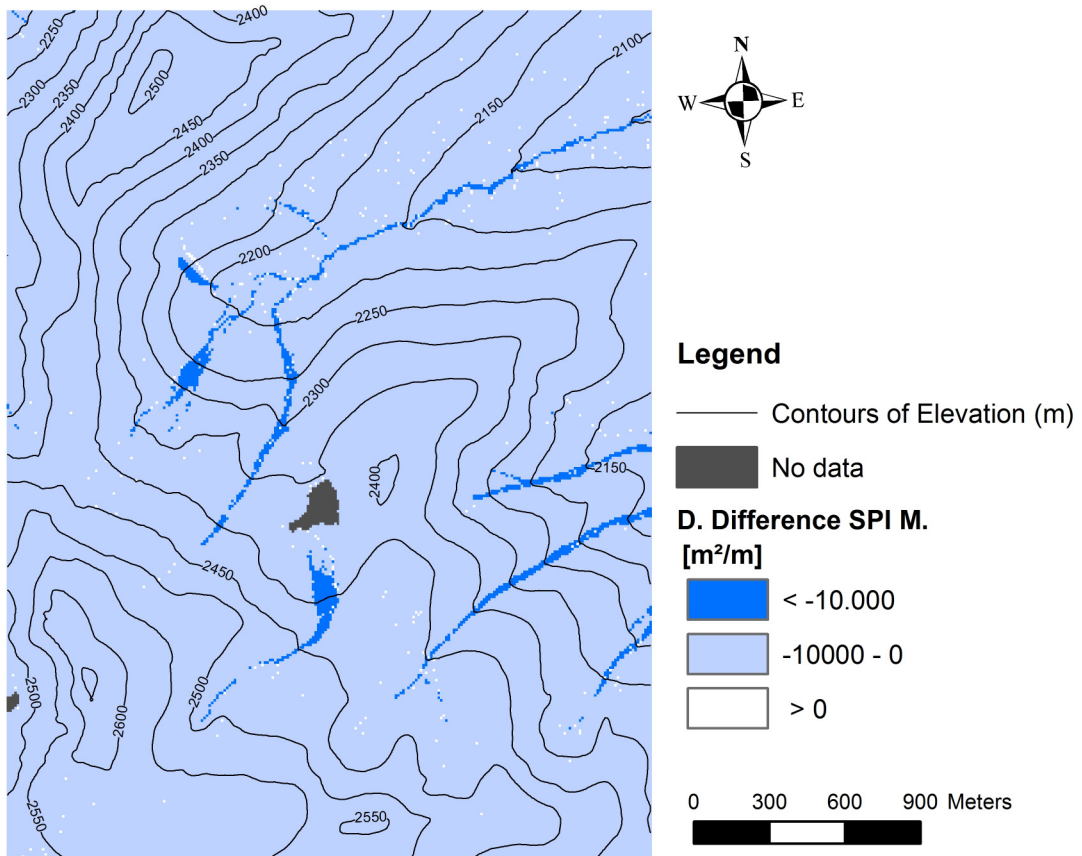
Μέγεθος φατνίου (m)	Μέσος όρος των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας (m ² /m)	Τυπική απόκλιση διαφορών (m ² /m)
5	-1006,12	17362,58
10	-2123,39	23042,72
25	-5246,61	30784,38
50	-10422,84	31199,29



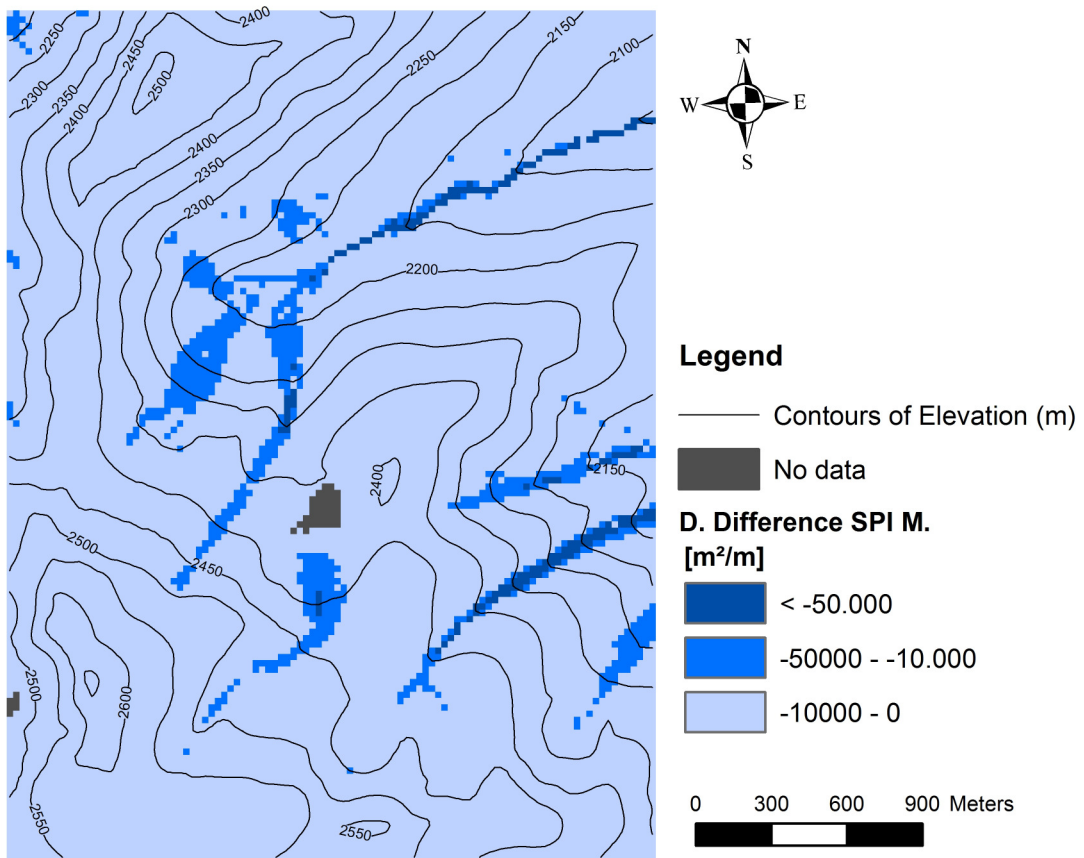
Εικόνα 53. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



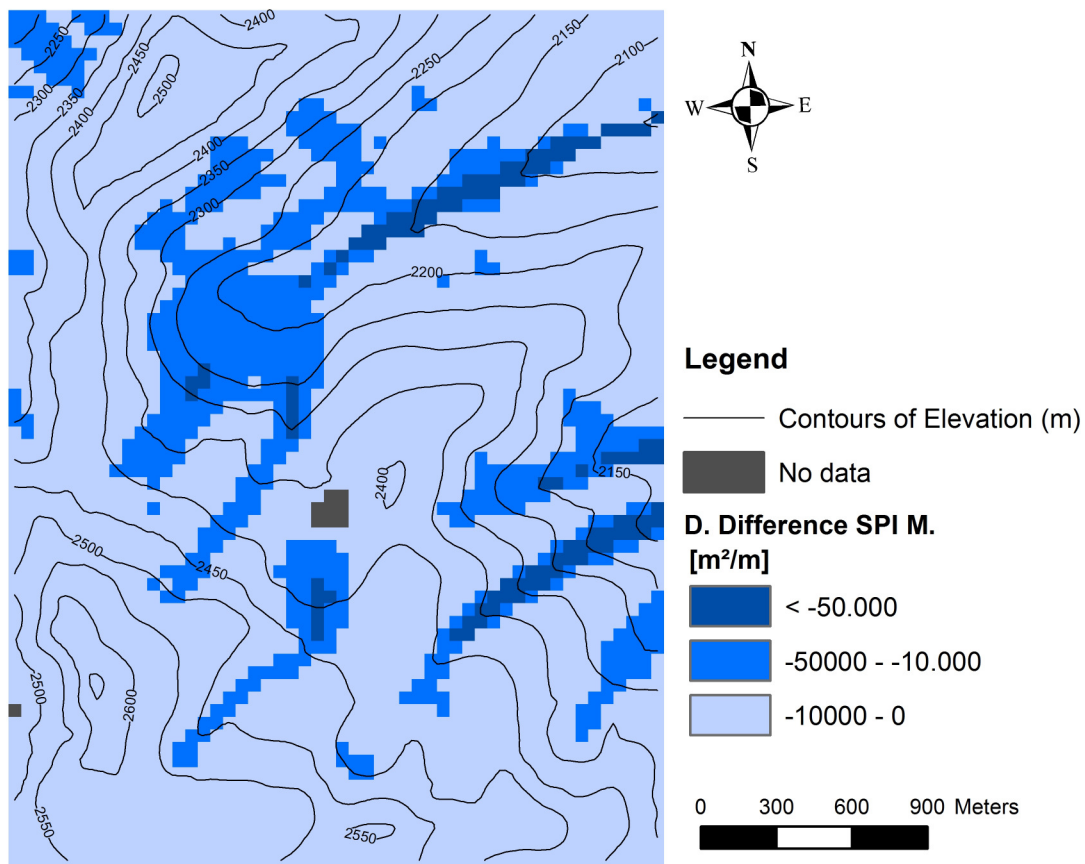
Εικόνα 54. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 55. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 56. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 57. Αναπαράσταση των διαφορών του δείκτη ροής ενέργειας του μοντέλου ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

5.3. Μελέτη Επίδρασης της Χωρικής Ανάλυσης στα Υδρογραφικά Χαρακτηριστικά

Η επιλογή της χωρικής ανάλυσης έχει αντίκτυπο στα υδρογραφικά χαρακτηριστικά, καθώς μεταβάλλει τα τοπογραφικά όρια των λεκανών απορροής και κατ' επέκταση την έκταση που ορίζουν, και επιπλέον την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου και τα μήκη των υδατορευμάτων. Χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ανάλυσης 1 m, ως αναφορά και βάσει της μεθοδολογικής προσέγγισης που αναλύθηκε, εφαρμόζεται η σύγκριση με τα παραγόμενα ψηφιακά μοντέλα ως προς τις παραμέτρους υδρολογικού ενδιαφέροντος.

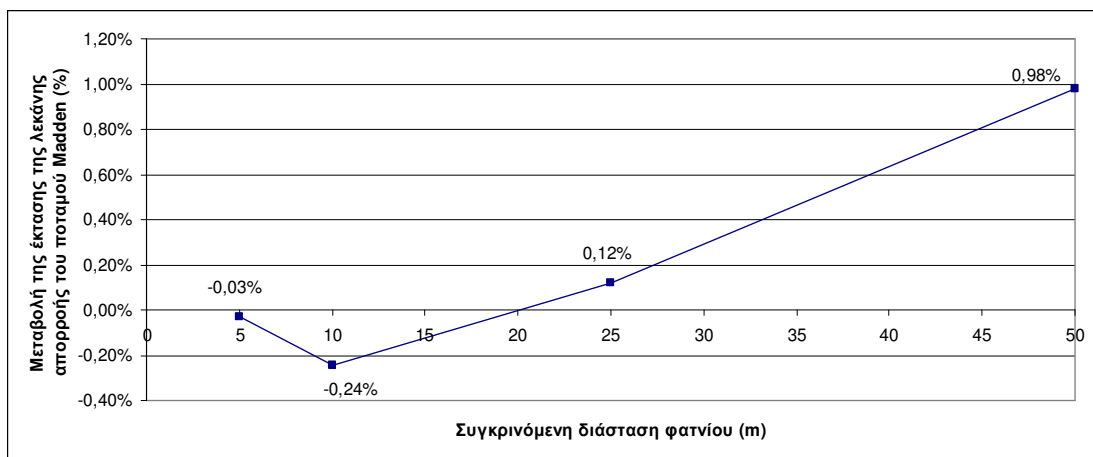
➤ Έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden

Βάσει των αποτελεσμάτων της έκτασης της λεκάνης απορροής (*Πίνακας 19* και *Εικόνα 58*) παρατηρείται μικρή μεταβολή της έκτασης, συναρτήσεως της χωρικής ανάλυσης. Ειδικότερα, η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στην σύγκριση με την χαμηλότερη χωρική ανάλυση και ανέρχεται περίπου στην τάξη του 1% απόκλισης του υπολογισθέντος εμβαδού. Τα αποτελέσματα είναι απολύτως αποδεκτά για την διεξαγωγή μιας

υδρολογικής μελέτης σε προκαταρτικό στάδιο, ακόμα και στην περίπτωση που διατίθεται ΨΜΥ με την χωρική ανάλυση των 50 m.

Πίνακας 19. Σύγκριση της έκτασης της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden

Χωρική ανάλυση μοντέλου (m)	Έκταση της λεκάνης απορροής (m ²)	Μεταβολή της έκτασης της λεκάνης απορροής (m ²)	Μεταβολή της έκτασης της λεκάνης απορροής (%)
1	5.286.819	-	-
5	5.288.525	-1.706	-0,032
10	5.299.700	-12.881	-0,243
25	5.280.625	6.194	0,117
50	5.235.000	51.819	0,980



Εικόνα 58. Απεικόνιση της μεταβολής της έκτασης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής

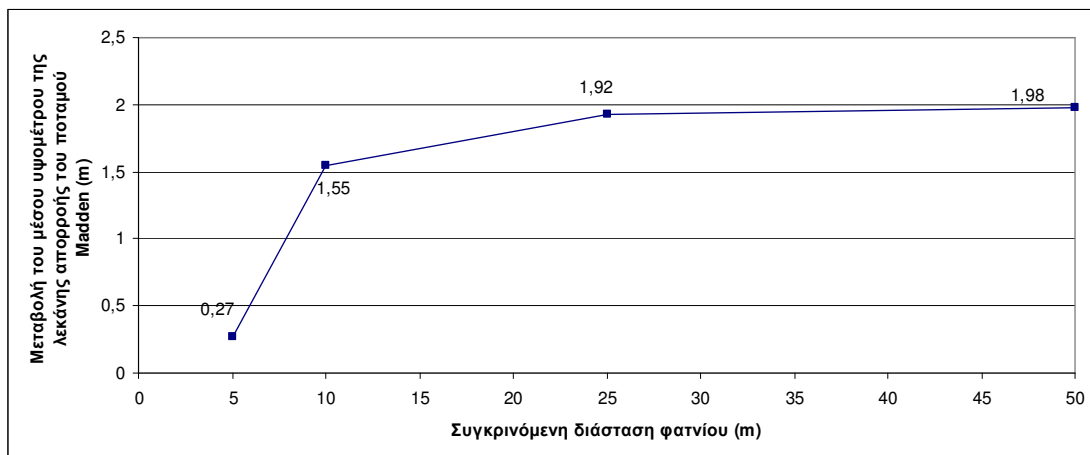
➤ **Σύγκριση των παραμέτρων του αναγλύφου της λεκάνης απορροής**

Γενικότερα, η κατανομή των κατακρημνισμάτων εξαρτάται από το πώς κατανέμεται η επιφάνεια της λεκάνης στα διάφορα υψόμετρα. Τα αποτελέσματα των παραμέτρων του αναγλύφου της λεκάνης (**Πίνακας 20** και **Εικόνα 59**) υπολογίζονται από τα στατιστικά στοιχεία που παρέχονται μέσω του λογισμικού ArcGIS, για την περιοχή της λεκάνης απορροής. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο υπολογισμός των εν λόγω στατιστικών μεγεθών προέκυψε χωρίς να συμπεριληφθούν οι αυθαίρετα συμπληρωμένες τιμές, στην περιοχή έλλειψης δεδομένων. Στις **Εικόνες 60a, 60b, 60c, 60d & 60e**, παρουσιάζονται οι υψομετρικές καμπύλες των συγκρινόμενων μοντέλων για την λεκάνη απορροής, και από την μορφή τους, συνάγεται το συμπέρασμα ότι, παρά το γεγονός ότι η χωρική ανάλυση στο μοντέλο μεταβάλλεται αισθητά, η κατανομή των υψομέτρων στην επιφάνεια της λεκάνης είναι η ίδια. Ωστόσο όπως είναι αναμενόμενο, το εύρος των τιμών του υψομέτρου (μέγιστο και ελάχιστο), καθώς και το μέσο υψόμετρο της λεκάνης μειώνονται κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης, λόγω της εξομάλυνσης που υφίσταται η αναπαράσταση του αναγλύφου της περιοχής. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι η διαδικασία

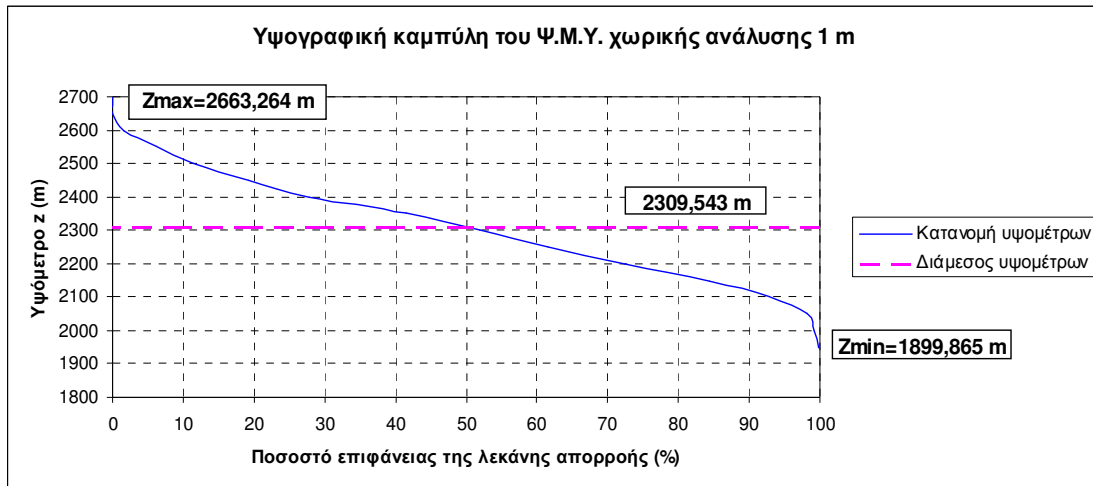
της παρεμβολής που εφαρμόζεται με την μέθοδο του αντιστρόφου απόστασης, στα νέφη σημείων LiDAR, επιδρά με διαφορετικό τρόπο στο κάθε μοντέλο. Ειδικότερα, κατά την εφαρμογή του παραθύρου παρεμβολής χάνονται τα τοπικά ακρότατα των δεδομένων τιμών, με αποτέλεσμα ο μέσος όρος που αποδίδεται στο ζητούμενο σημείο να υποεκτιμά την τιμή ως προς το μέγιστο και να υπερεκτιμά την τιμή ως προς το ελάχιστο. Επομένως, η μέγιστη διαφορά των 2 m μεταξύ του μέσου υψόμετρου της υψηλότερης ανάλυσης και εκείνου της χαμηλότερης, είναι σε αποδεκτά πλαίσια, δεδομένου ότι τα μοντέλα υφίσταται διαδικασίες (όπως η παρεμβολή και η πλήρωση των βυθισμάτων) που επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην διαμόρφωση των τελικών υψομέτρων. Τέλος, η τιμή της διαμέσου στις ακόλουθες υψογραφικές καμπύλες αναφέρεται στην παρατήρηση εκείνη για την οποία το 50% των τιμών είναι μεγαλύτερες της. Η διάμεσος αποτελεί ένα στατιστικό μέγεθος, παρατίθεται για λόγους πληρότητας και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο μέγεθος ανάμεσα στα εν λόγω μοντέλα, καθώς το πλήθος των δεδομένων τιμών μεταβάλλεται και έτσι, είναι πολύπλοκο να ελεγχθεί η συγκεκριμένη στατιστική παράμετρος.

Πίνακας 20. Σύγκριση βασικών υψομέτρων της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden

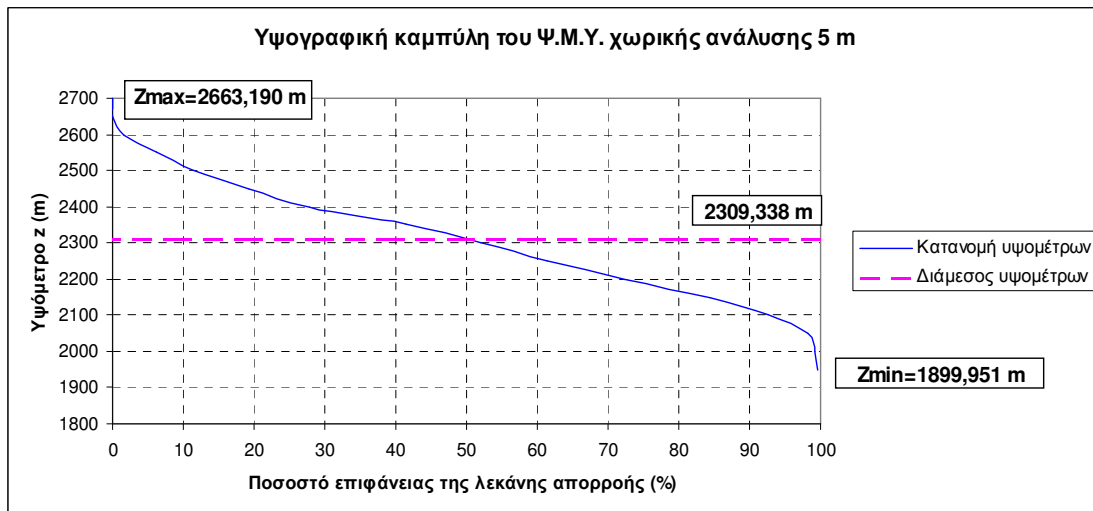
Χωρική Ανάλυση μοντέλου (m)	Ελάχιστο υψόμετρο λεκάνης (m)	Μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης (m)	Μέσο υψόμετρο λεκάνης (Z_m) (m)	Μεταβολή του μέσου υψόμετρου της λεκάνης (m)
1	1899,865	2663,264	2308,667	-
5	1899,951	2663,190	2308,398	0,269
10	1900,614	2662,313	2307,118	1,549
25	1900,614	2657,450	2306,744	1,924
50	1903,721	2642,450	2306,689	1,979



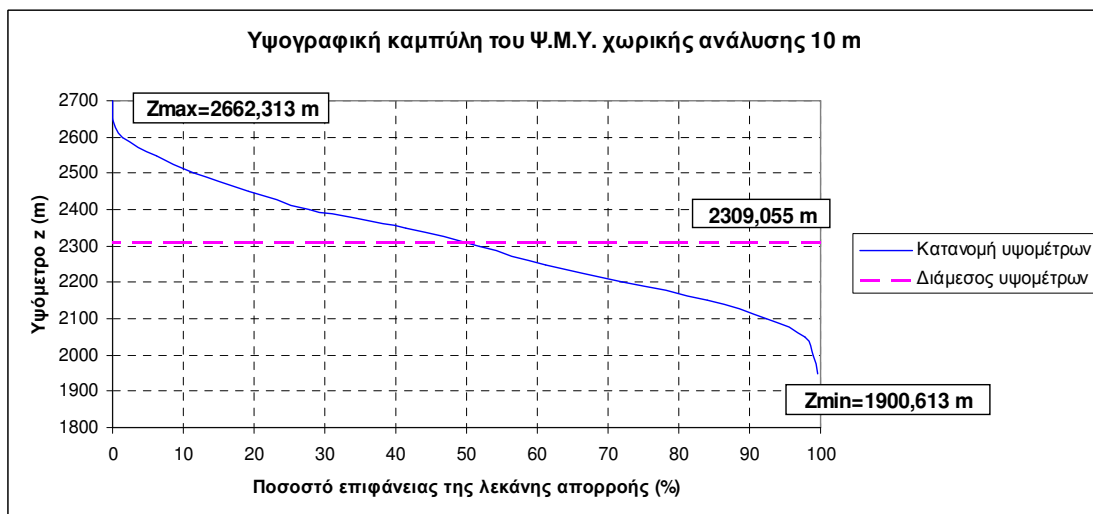
Εικόνα 59. Μεταβολή του μέσου υψόμετρου της υπό μελέτη λεκάνης απορροής



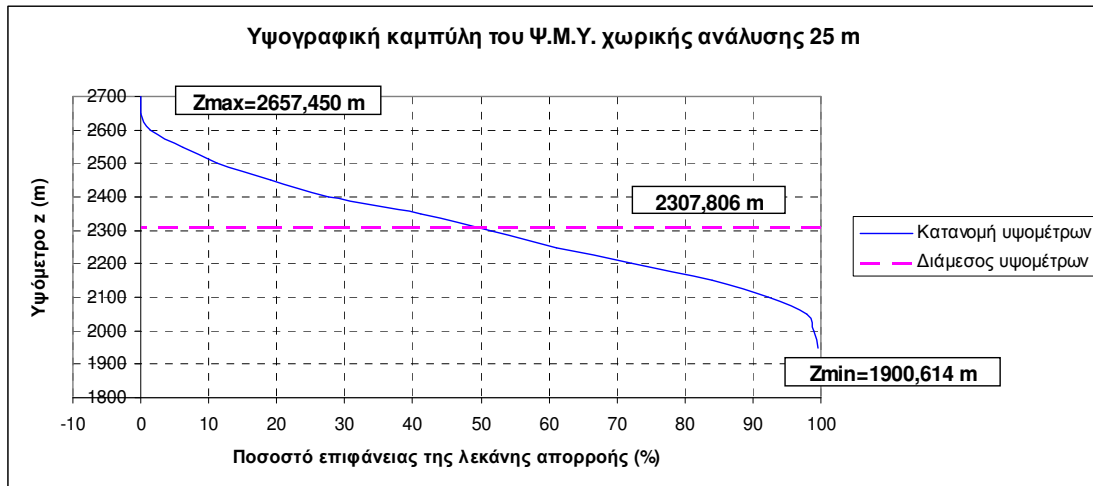
Εικόνα 60α. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1 m



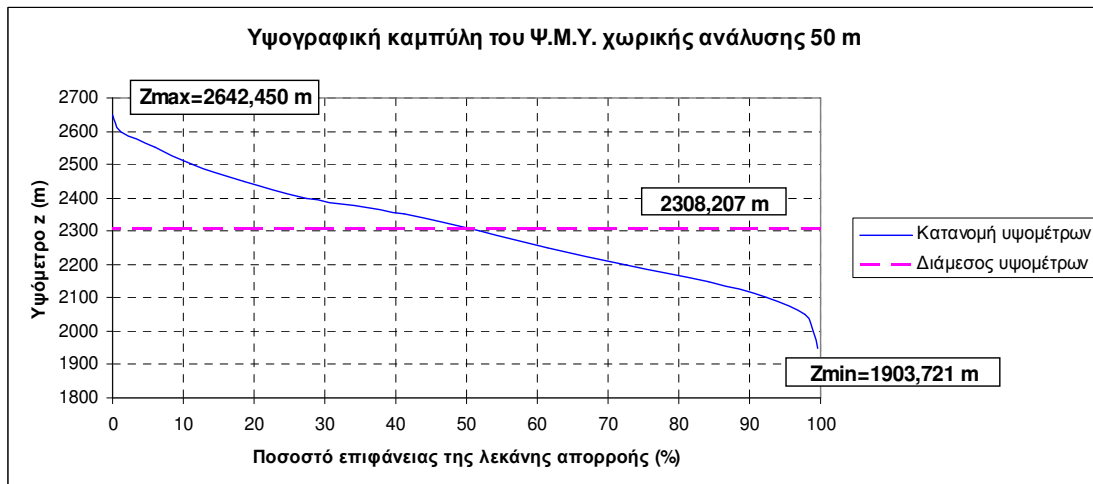
Εικόνα 60b. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 5 m



Εικόνα 60c. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 10 m



Εικόνα 60d. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m

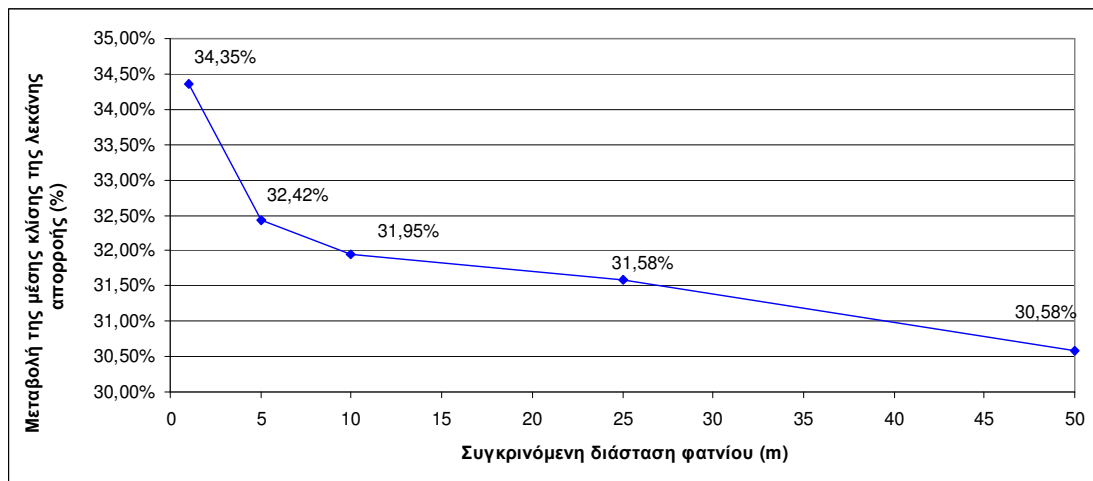


Εικόνα 60e. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m

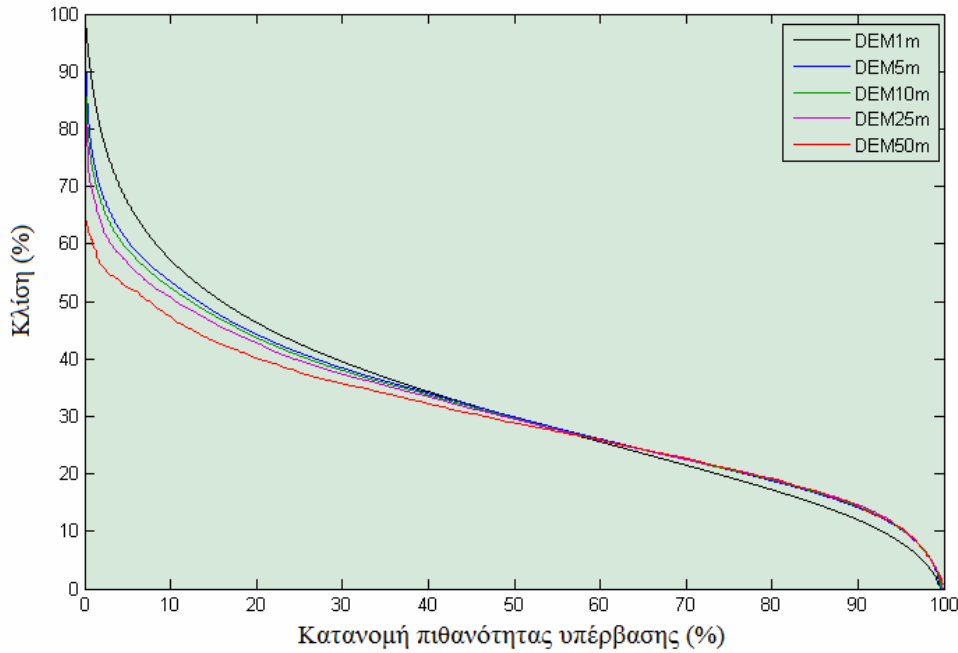
Στον Πίνακα 21 και στην Εικόνα 61 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού της μέσης κλίσης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή τους. Τα αποτελέσματα αιτιολογούνται λόγω εξομάλυνσης των υψομέτρων και κατ' επέκταση και των κλίσεων, κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης. Επιπλέον, στην Εικόνα 62 προβάλλονται διαγραμματικά οι τιμές των κλίσεων των μοντέλων σε συνάρτηση με την πιθανότητα υπέρβασης, ως ένδειξη της κατανομής των κλίσεων στην λεκάνη απορροής. Όπως παρατηρείται στην εικόνα, με την μείωση της χωρικής ανάλυσης το πλήθος των παρατηρήσεων μειώνεται και η κατανομή των κλίσεων αλλάζει αισθητά στις μεγαλύτερες τιμές των παρατηρούμενων κλίσεων. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή της κλίσης μικραίνει στην μικρότερη χωρική ανάλυση, και ως εκ τούτου το μοντέλο αποδίδεται με πιο ήπιο ανάγλυφο. Παρ' όλα αυτά, διαπιστώνεται ότι τα συγκρινόμενα μοντέλα χωρικών αναλύσεων 5 m έως 50 m, εμφανίζουν όμοια κατανομή σε χαμηλές τιμές κλίσεων. Επιπλέον, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα μοντέλα που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ομοιότητα στην κατανομή των κλίσεων είναι αυτά που έχουν χωρική ανάλυση 5 m και 10 m.

Πίνακας 21. Σύγκριση της μέσης κλίσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Madden

Μέγεθος Φατνίου (m)	Μέση κλίση της λεκάνης απορροής (S_g)(%)	Μεταβολή της μέσης κλίσης (%)
1	34,35	-
5	32,42	5,63
10	31,95	6,99
25	31,58	8,07
50	30,58	10,97



Εικόνα 61. Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης κλίσης της λεκάνης απορροής



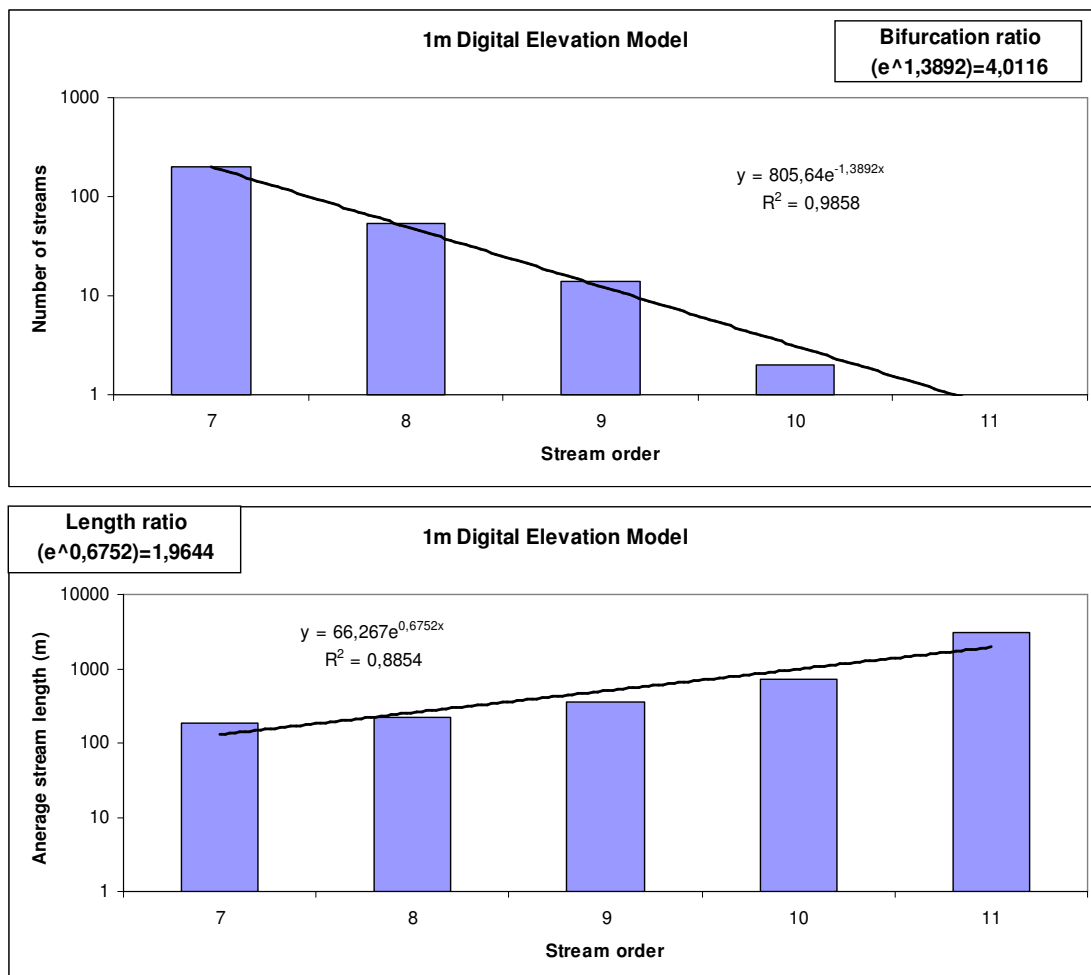
Εικόνα 62. Κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης για την παράμετρο της μέσης κλίσης της υπό μελέτη λεκάνης, στα συγκρινόμενα ΨΜΥ

Τέλος, η μείωση της μορφολογικής κλίσης της λεκάνης κατά την αύξηση του μεγέθους του φατνίου έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται ο συντελεστής κατείσδυσης για την περιοχή της λεκάνης, δηλαδή, παρατηρείται αύξηση του ποσοστού του νερού που διεισδύει στο έδαφος σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Η επισήμανση αυτή σχετίζεται και με τα αποτελέσματα της σύγκρισης του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας, όπου με την μείωση της χωρικής ανάλυσης στο μοντέλο, προκύπτουν υψηλότερες τιμές του δείκτη, δηλαδή το έδαφος αποδίδεται με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό.

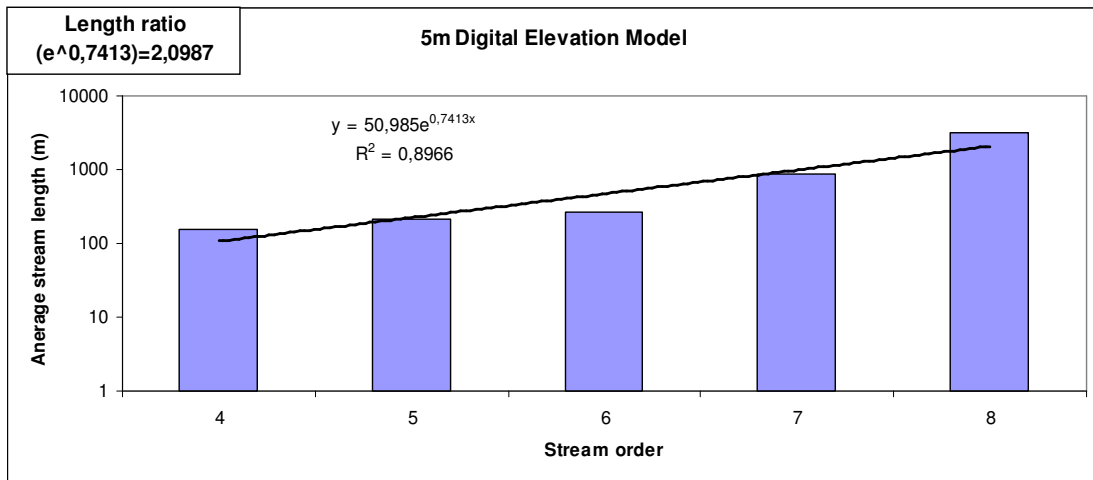
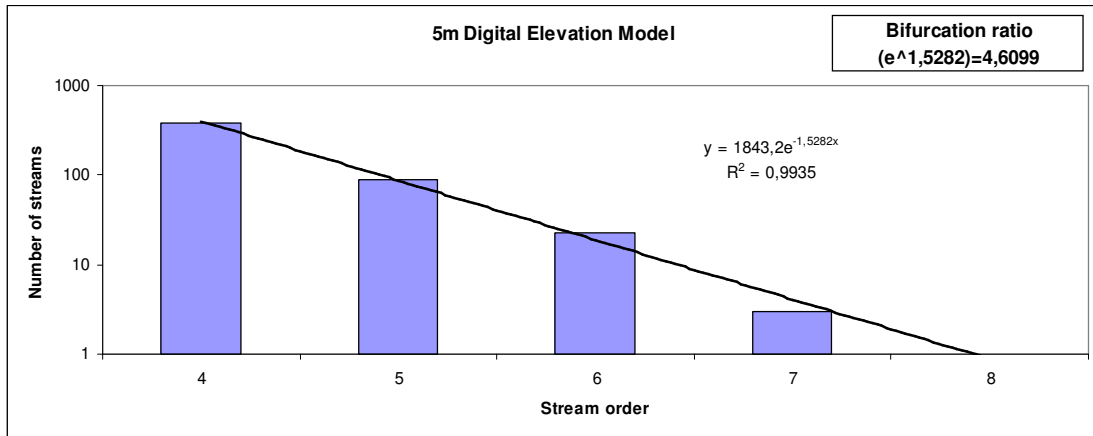
➤ **Νόμοι υδρογραφικής σύνθεσης κατά Horton**

Ο έλεγχος της ισχύος των εμπειρικών σχέσεων του Horton για την λεκάνη απορροής του ποταμού Madden, πραγματοποιείται με εφαρμογή των νόμων οι οποίοι χαρακτηρίζουν τη μορφολογία και τη δομή του δικτύου αποστράγγισης, σε κάθε περίπτωση εξεταζόμενου μοντέλου. Τα αριθμητικά δεδομένα, που αφορούν στον αριθμό των ρευμάτων και το μέσο μήκος τους, προβάλλονται σε ημιλογαριθμική κλίμακα συναρτήσεως της τάξης των ρευμάτων. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται, καθώς μελέτες υδρογραφικών δικτύων σε διαφορετικά τοπία, έχουν επιβεβαιώσει ότι η απεικόνιση των δεδομένων σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα είναι σχεδόν γραμμική (Helmlinger & Georgiou, 1992). Σε κάθε περίπτωση, η ευθεία που σχηματίζεται στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα περιγράφεται από μια εκθετική εξίσωση, η οποία προσαρμόζεται στα δεδομένα με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, εμφανίζοντας έναν ισχυρό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (R^2). Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι ακόμα και στις περιπτώσεις όπου δεν προκύπτει γραμμική σχέση στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα κατά την προσαρμογή της εκθετικής εξίσωσης, μπορούν οι λόγοι κατά Horton να υπολογιστούν προσεγγιστικά. Στον **Πίνακα**

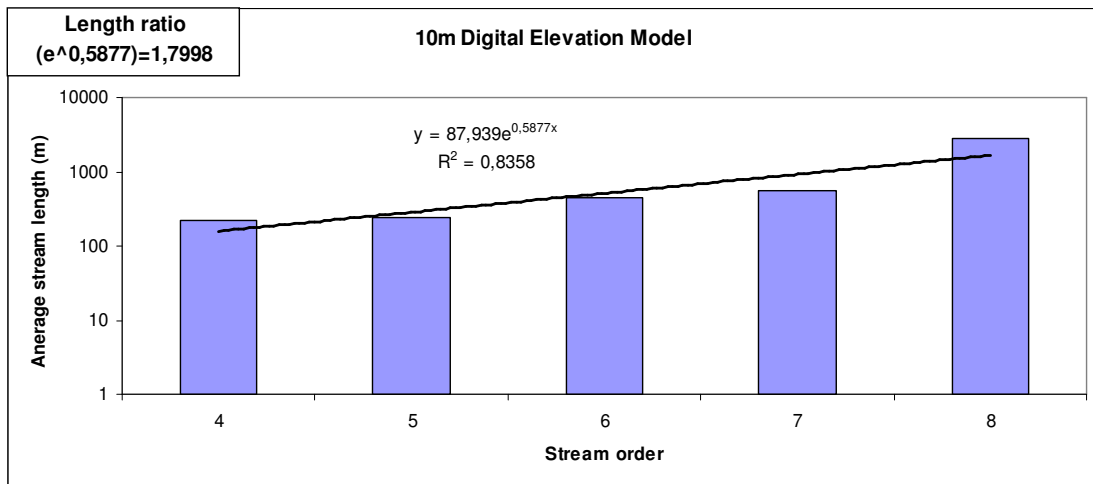
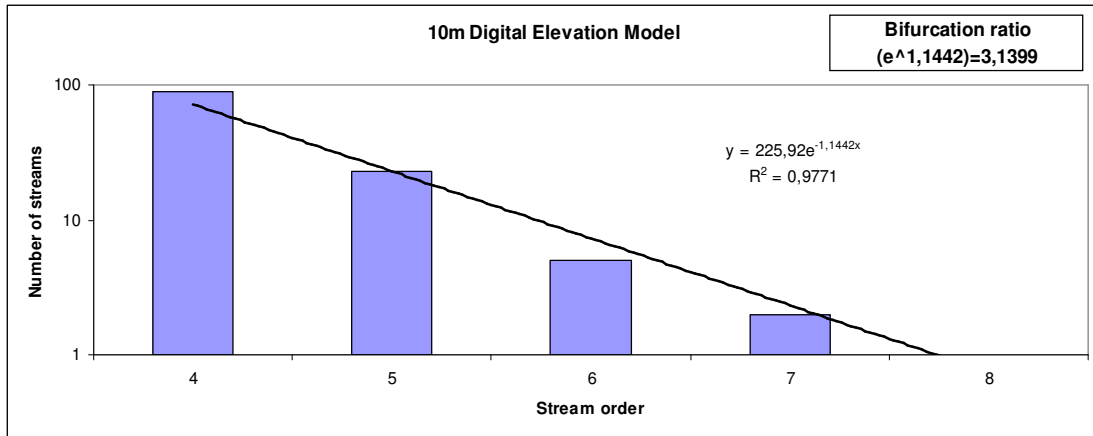
22 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των λόγων κατά Horton, έως και τέσσερις τάξεις του υδρογραφικού δικτύου. Όπως παρατηρείται, ο αριθμός των ρεμάτων μειώνεται γεωμετρικά κατά την αύξηση της τάξης του ρέματος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στις χαμηλότερες χωρικές αναλύσεις το ελικοειδές σχήμα των καναλιών δεν αποδίδεται με ορθό τρόπο λόγω της ελάχιστης επιφανειακής μονάδας του μοντέλου, και αυτό έχει αντίκτυπο στην διαμόρφωση του μέσου μήκους των ρεμάτων σε κάθε τάξη του δικτύου και ειδικότερα στις μεγαλύτερες τάξεις μπορεί να αποκλίνει σημαντικά. Παρ' όλα αυτά, σημειώνεται ότι καλύτερη προσέγγιση των λόγων προκύπτει στην χαμηλότερη τάξη του υδρογραφικού δικτύου, όπου οι λόγοι παρουσιάζουν σχεδόν όμοιες τιμές. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται εν μέρει από το γεγονός ότι όσο η τάξη του δικτύου μικραίνει, τόσο το πλήθος των παρατηρήσεων αυξάνεται, επομένως προκύπτει καλύτερη προσέγγιση των λόγων. Επιπλέον, στις **Εικόνες 63, 64, 65, 66 και 67** απεικονίζεται η συμπεριφορά του μέσου μήκους και του πλήθους των ρεμάτων συναρτήσει των τάξεων, με σκοπό να υπολογιστούν οι μέσοι όροι του R_L και R_B για κάθε περίπτωση.



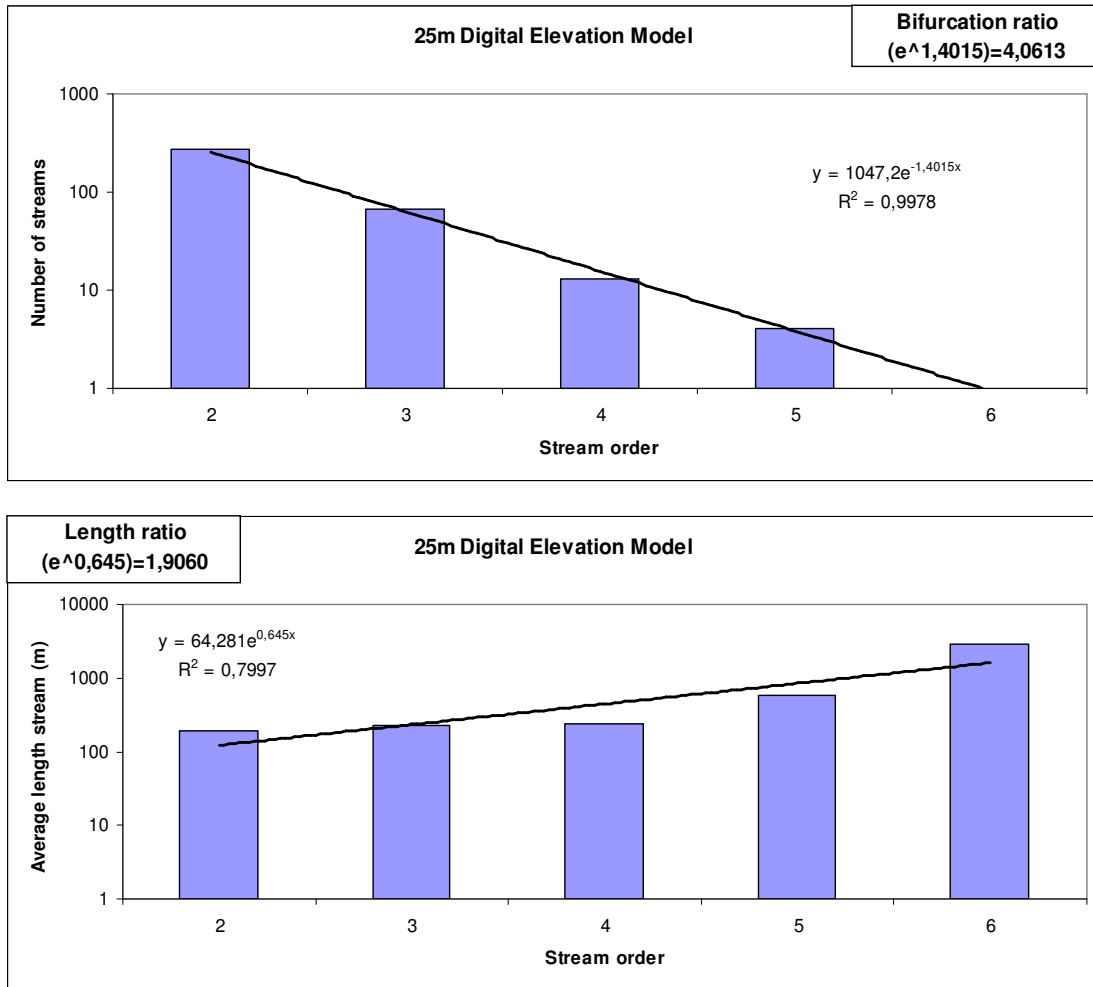
Εικόνα 63. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 1m



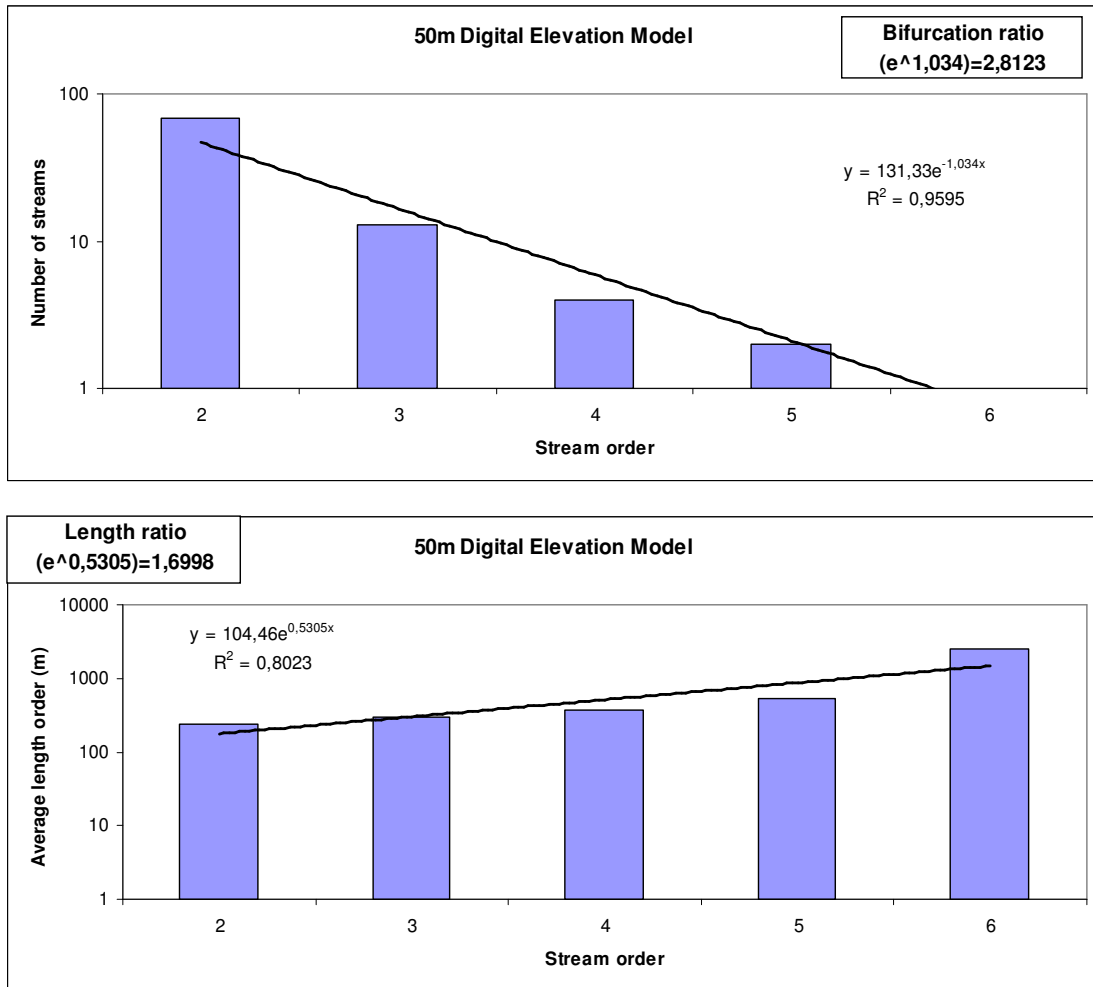
Εικόνα 64. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 5m



Εικόνα 65. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 10m



Εικόνα 66. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 25m



Εικόνα 67. Προσδιορισμός του μέσου λόγου διακλάδωσης και μήκους στο ΨΜΥ, ανάλυσης 50m

Πίνακας 22. Λόγοι Horton για το υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης απορροής

Ανάλυση ΨΜΥ (m)	Τάξη ρεύματος	Πλήθος ρευμάτων	Μέσο μήκος ρευμάτων (m)	R _B	R _L
1	11	1	3065,115	2,00	4,33
5	8	1	3106,554	3,00	3,62
10	8	1	2744,214	2,00	5,06
25	6	1	2924,569	4,00	5,00
50	6	1	2502,082	2,00	4,62
1	10	2	707,154	7,00	1,99
5	7	3	857,193	7,67	3,18
10	7	2	542,487	2,50	1,20
25	5	4	584,359	3,25	2,41
50	5	2	541,421	2,00	1,46
1	9	14	354,891	3,86	1,59
5	6	23	269,932	3,91	1,29
10	6	5	452,215	4,60	1,87
25	4	13	242,685	5,08	1,08
50	4	4	371,599	3,25	1,26
1	8	54	222,936	3,70	1,19
5	5	90	209,229	4,22	1,35
10	5	23	241,743	3,91	1,11
25	3	66	224,089	4,12	1,19
50	3	13	295,541	5,31	1,24

Στον **Πίνακα 23** προβάλλονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μέσης τιμής των λόγων κατά Horton, για την λεκάνη απορροής του ποταμού Madden, στα συγκρινόμενα μοντέλα. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του λόγου διακλάδωσης, επισημαίνεται ότι η χαμηλή τιμή του στο ΨΜΥ ανάλυσης 50 m, υποδεικνύει αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων και παράλληλα απόδοση του σχήματος της λεκάνης απορροής με πιο κυκλική γεωμετρία, σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα. Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι ο λόγος διακλάδωσης σχετίζεται με γεωμορφολογικούς παράγοντες, διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση ανάλυσης των 50 m, η περιοχή αποδίδεται με πιο επίπεδη γεωμετρία. Ικανοποιητικότερα αποτελέσματα παρατηρούνται στις τιμές των λόγων μήκους, όπου οι λόγοι εμφανίζουν περίπου ίδιες τιμές, γεγονός που ερμηνεύει ομοιότητα των ΨΜΥ στην απόδοση της γεωμετρικής σχέσης των μηκών, συναρτήσει των τάξεων. Παρ' όλα αυτά ο υπολογισμός του λόγου των λογαρίθμων των δεικτών ($\log R_B / \log R_L$) εμφανίζει παραπλήσιες τιμές σε κάθε περίπτωση, με αποτέλεσμα

να εντοπίζεται μια στατιστική ομοιότητα της λεκάνης, παρά την χρήση μοντέλων διαφορετικής χωρικής ανάλυσης.

Πίνακας 23. Σύγκριση των λόγων Horton για το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Madden

Χωρική ανάλυση ΨΜΥ (m)	Λόγος διακλάδωσης (R _B)	Λόγος Μήκους (R _L)	logR _B /logR _L
1	4,01	1,96	2,06
5	4,61	2,10	2,06
10	3,14	1,80	1,95
25	4,06	1,91	2,17
50	2,81	1,70	1,95

Κρίνεται σκόπιμο να επισημειωθούν ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τον υπολογισμό των λόγων κατά Horton. Παρά το γεγονός ότι οι λόγοι αποτελούν μία ένδειξη του πώς διαμορφώνεται η δομή του αποστραγγιστικού δικτύου στο κάθε μοντέλο, κατά τον υπολογισμό τους, προκύπτουν δύο πρακτικά προβλήματα: Πρώτον, οι λόγοι αποτελούν εμπειρικές σχέσεις και επομένως γίνεται μία εκτίμηση αυτών, και δεύτερον, τα πρωτογενή δεδομένα (υψόμετρα) που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του δικτύου, επηρεάζονται τόσο από την μεταβολή των τιμών στην λεκάνη συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης και των διαδικασιών προεπεξεργασίας που υφίστανται, όσο και από την συμπλήρωση των τιμών, στην περιοχή έλλειψης δεδομένων.

➤ **Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου**

Στους **Πίνακες 24** και **25** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν χαρακτηριστικά μεγέθη του υδρογραφικού δικτύου.

Πίνακας 24. Σύγκριση του μήκους του κύριου υδατορεύματος Madden, της λεκάνης απορροής

Μέγεθος Φατνίου (m)	Μήκος κύριου υδατορεύματος (m)	Μεταβολή του μήκους του κύριου υδατορεύματος (%)
1	5826,920	-
5	5542,422	4,88
10	5208,427	10,61
25	5105,940	12,37
50	4921,320	15,54

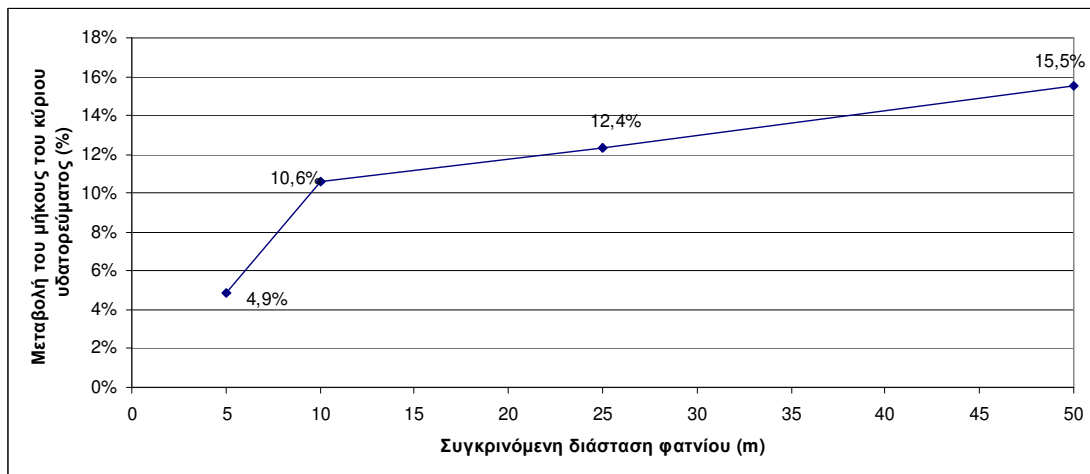
Πίνακας 25. Σύγκριση χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου, της λεκάνης απορροής

Μέγεθος Φατνίου (m)	Εύρος τάξεως ⁶	Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου (m ⁻¹)	Μέση διαδρομή επίγειας ροής (m)
1	11 έως 2	0,555	0,901
5	8 έως 1	0,243	2,059
10	8 έως 1	0,122	4,100
25	6 έως 1	0,049	10,231
50	6 έως 1	0,024	20,480

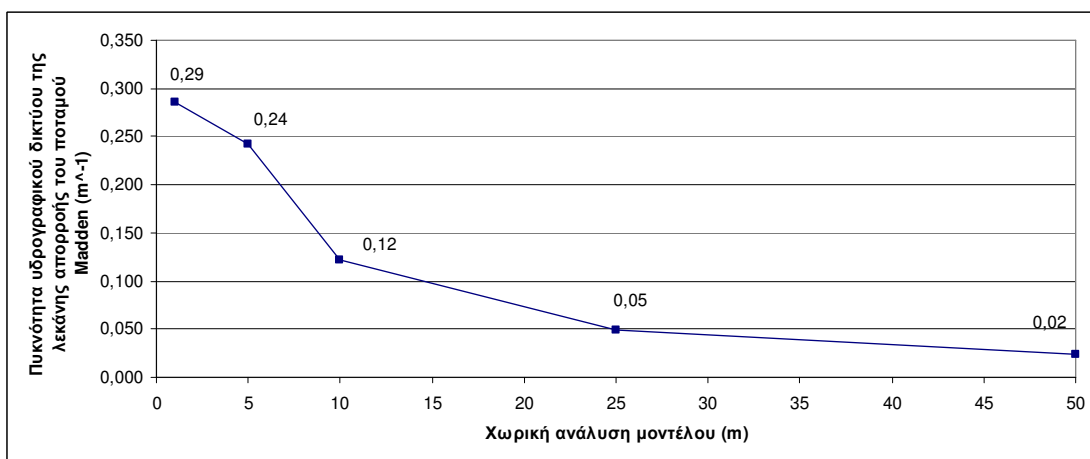
Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η αύξηση του μεγέθους του φατνίου επιφέρει μείωση του συνολικού μήκους ροής, μείωση της υδρογραφικής πυκνότητας του δικτύου και αύξηση του μήκους μέσης επιφανειακής απορροής. Αυτό συμβαίνει διότι στην χαμηλότερη ανάλυση του ΨΜΥ, δεν επιτρέπεται ο διαχωρισμός της απόστασης μεταξύ των καναλιών και των ορίων αποστράγγισης και ως απόρροια αυτών ο αριθμός των ρεμάτων, τα μήκη των υδατορευμάτων, η έκταση της λεκάνης απορροής και η σκιαγράφηση του δικτύου αποστράγγισης μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από το μοντέλο αναφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές, εάν τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, που χαρακτηρίζονται από μικρό μήκος, είναι σημαντικά στην διεξαγωγή μιας μελέτης, τότε η επιλογή της χωρικής ανάλυσης θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος αυτών των χαρακτηριστικών, ώστε να επιτρέπεται η απόδοση τους κατά την αναπαράσταση. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου εμφανίζεται υψηλότερη στην μεγαλύτερη χωρική ανάλυση του μοντέλου, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς μικρό μέγεθος ψηφίδας σημαίνει πιο λεπτομερή αναπαράσταση του αναγλύφου. Όσον αφορά την μέση διαδρομή της επίγειας ροής παρατηρείται αύξηση στην μεγαλύτερη διάσταση φατνίου και το γεγονός αυτό είναι συνυφασμένο με την απόδοση της πυκνότητας του δικτύου, καθώς στο συρρικνωμένο δίκτυο, η απόσταση από την υδροκριτική γραμμή αυξάνει. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία της γενίκευσης της πληροφορίας υποεκτιμά τα μήκη στην χαμηλότερη χωρική ανάλυση και συρρικνώνει δίκτυα υψηλής πυκνότητας αποστράγγισης. Ωστόσο, η υφιστάμενη μελέτη αξιοποιεί δεδομένα μιας δειγματοληψίας σε περιοχή συγκεκριμένης μορφολογίας και επομένως δεν θα μπορούσε να εξαχθεί ένα γενικότερο συμπέρασμα. Για την εν λόγω λεκάνη απορροής, η στατιστική απόκλιση του 15% για το μήκος του κύριου υδατορεύματος Madden -στην χαμηλότερη χωρική ανάλυση- κρίνεται ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που σχετίζονται με την υπό μελέτη λεκάνη απορροής, όπως είναι η έκταση της, η μορφολογία της, η ποιότητα των αρχικών δεδομένων, κ.ά. Στις **Εικόνες 68, 69 & 70** απεικονίζονται οι μεταβολές των εν λόγω μεγεθών συναρτήσει της ανάλυσης του

⁶ Αναφέρεται στις τάξεις των ρεμάτων των οποίων τα μήκη αξιοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου.

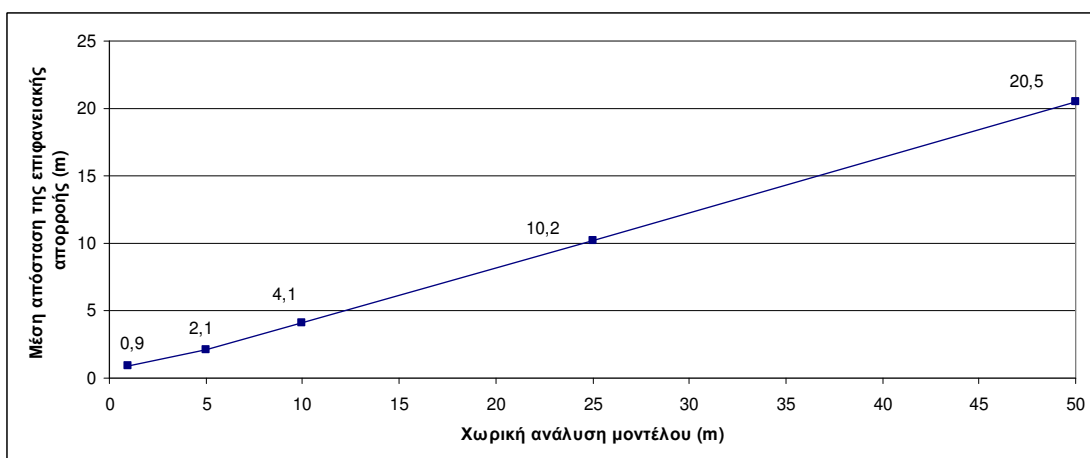
μοντέλου, και στις **Εικόνες 71a, 71b, 71c, 71d & 71e** αναπαρίσταται η κύρια μισγάγγεια της υπό μελέτη λεκάνης για κάθε μοντέλο.



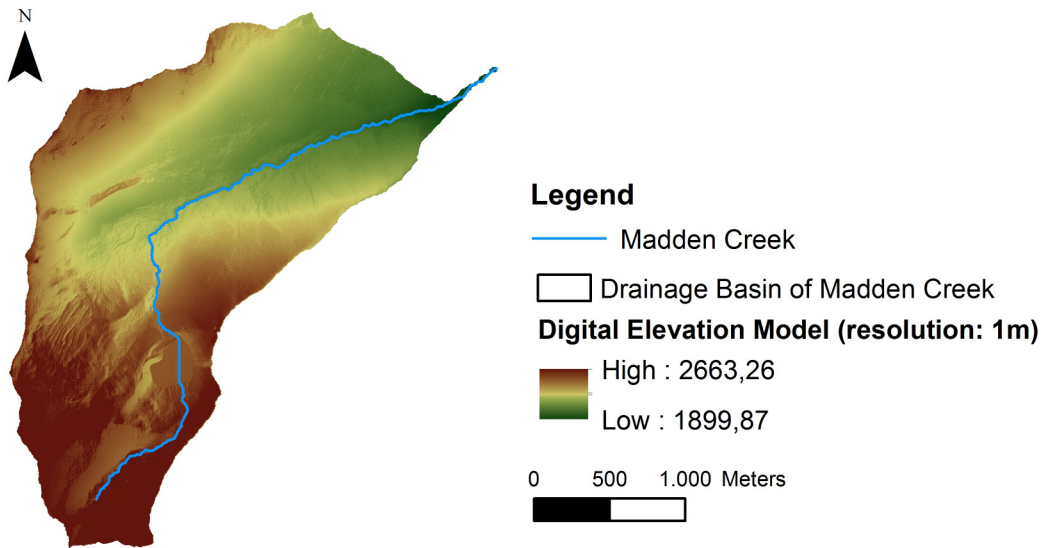
Εικόνα 68. Απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής του μήκους του κύριου υδατορεύματος



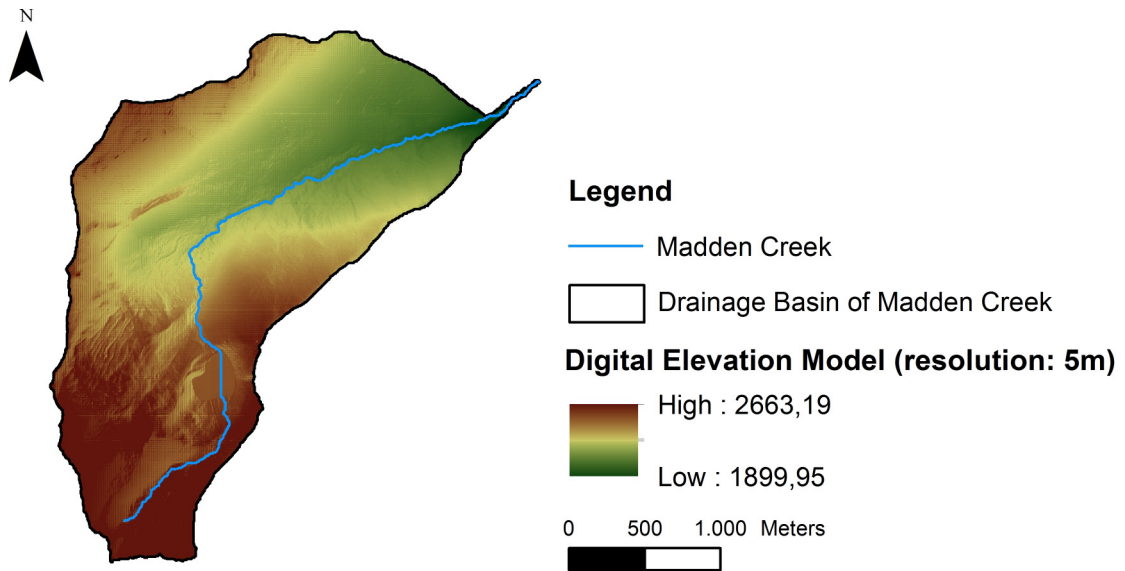
Εικόνα 69. Απεικόνιση της πυκνότητας υδρογραφικού δικτύου, συναρτήσει της ανάλυσης του μοντέλου



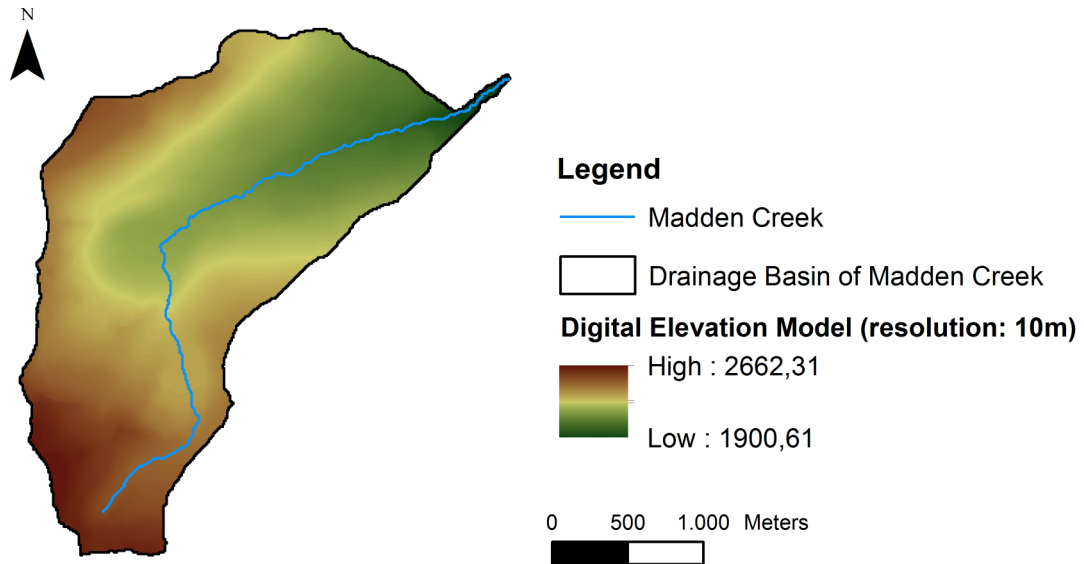
Εικόνα 70. Απεικόνιση του μέσου μήκους επιφανειακής απορροής συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



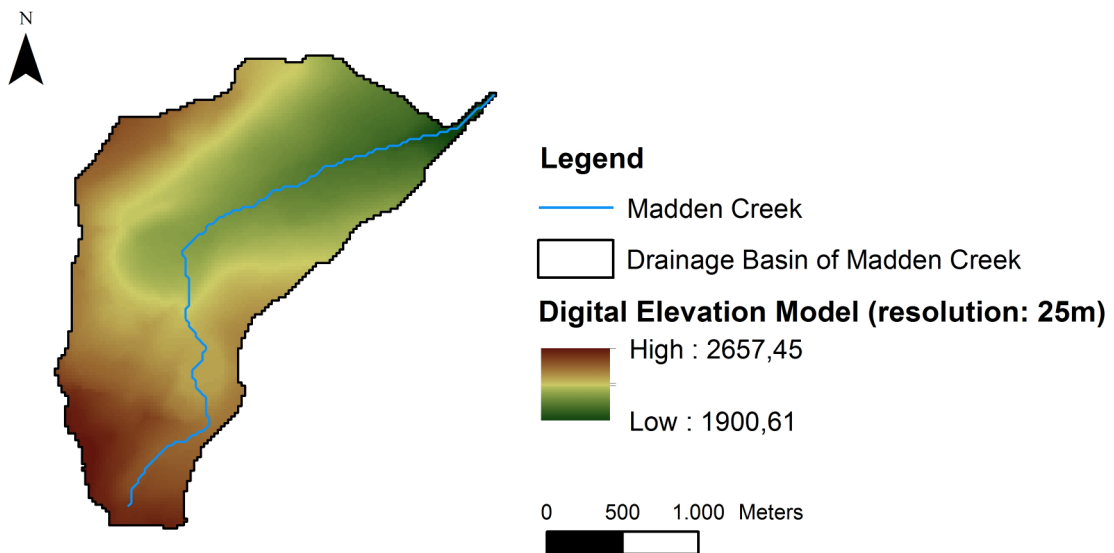
Εικόνα 71a. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1 m



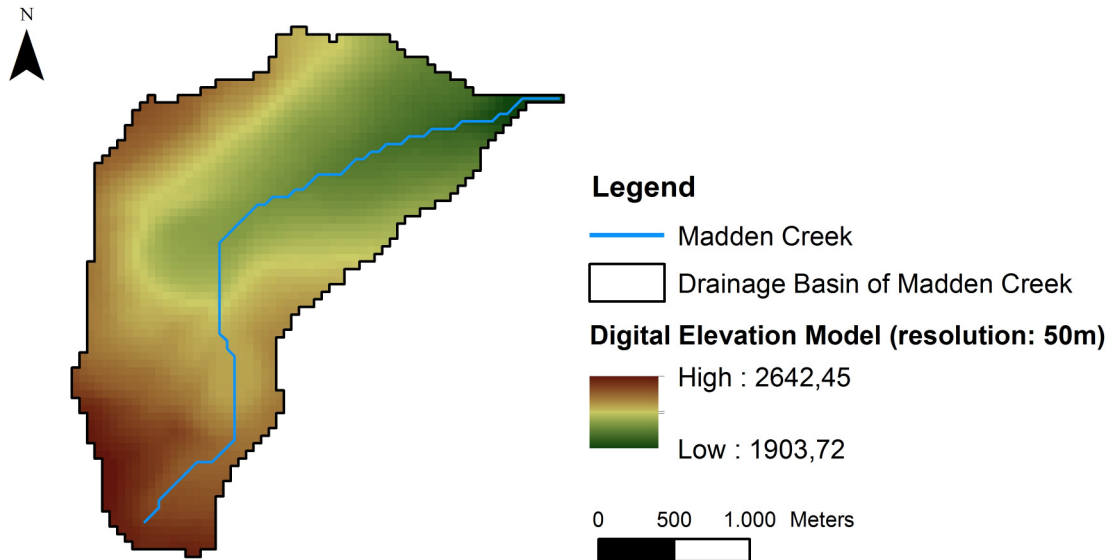
Εικόνα 71b. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 5 m



Εικόνα 71c. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 10 m



Εικόνα 71d. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m



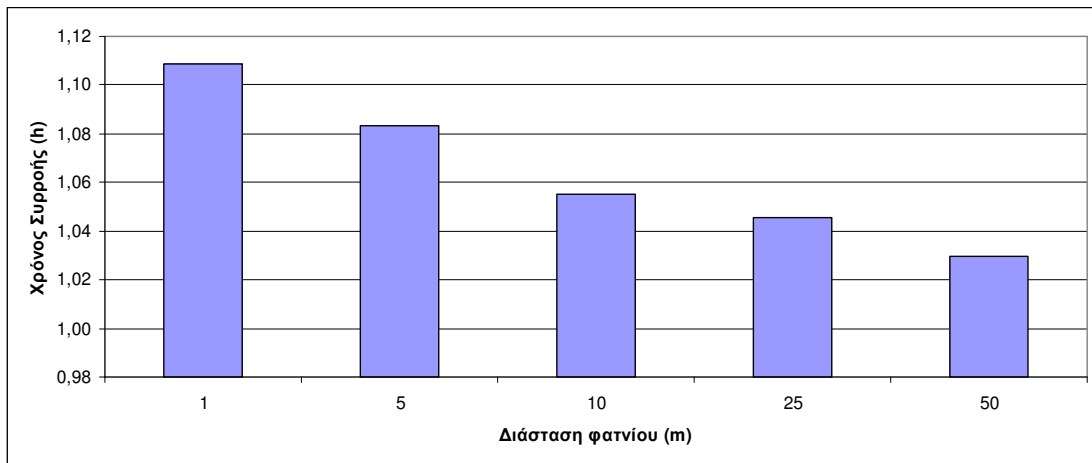
Εικόνα 71ε. Ορισμός του κύριου υδατορεύματος Madden στο ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m

➤ Χρόνος συγκέντρωσης

Τα αποτελέσματα αναφορικά με τον χρόνο συγκέντρωσης -ή διαφορετικά, χρόνο συρροής της λεκάνης απορροής- υποδεικνύουν μια σχετική ανεξαρτησία του συγκεκριμένου αυτού υδρολογικού μεγέθους από την μεταβολή της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου (**Πίνακας 26** και **Εικόνα 72**). Ωστόσο, ο μικρότερος χρόνος συγκέντρωσης του περισσεύματος βροχής εντοπίζεται για το μοντέλο της χαμηλότερης ανάλυσης και συνδέεται με υψηλές πλημμυρικές αιχμές και αύξηση των φερτών υλικών. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει και από την τιμή του λόγου διακλάδωσης στο ΨΜΥ των 50 m, όπου η μικρή τιμή του υποδηλώνει αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων και επιπλέον, από τα αποτελέσματα της σύγκρισης του συντελεστή αναγλύφου LS, όπου η χωρική ανάλυση των 50 m συνδέεται με αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης και μεταφοράς φερτών υλικών και ιζημάτων, σε σχέση με τα υπόλοιπα συγκρινόμενα μοντέλα. Ωστόσο, ως γενικό συμπέρασμα συνάγεται ότι η τιμή του χρόνου συρροής δείχνει να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από την επιλογή της χωρικής ανάλυσης, η οποία μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

Πίνακας 26. Σύγκριση του χρόνου συρροής της λεκάνης απορροής

Χωρική ανάλυση ψηφιακού μοντέλου (m)	Διαφορά ελάχιστου από το μέσο υψόμετρο της λεκάνης (m)	Έκταση λεκάνης (km ²)	Μήκος κύριου υδατορεύματος (km)	Χρόνος Συρροής (hours)
1	408,802	5,287	5,827	1,109
5	408,447	5,289	5,542	1,083
10	406,505	5,300	5,208	1,055
25	406,130	5,281	5,106	1,045
50	402,968	5,235	4,921	1,030



Εικόνα 72. Χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, από ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Γενικά Συμπεράσματα

Σε μία τελική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία συμβάλλουν στην κατανόηση των δυνατοτήτων, αλλά και των περιορισμών που θέτει η χρήση των ΨΜΥ στην εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής, με τις γεωμορφομετρικές μεθόδους ανάλυσης. Μέσα από το θεωρητικό και το μεθοδολογικό πλαίσιο της υφιστάμενης μελέτης, αναδεικνύονται τα επιμέρους στάδια της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, όπου αξιοποιώντας δεδομένα υψηλής ποιότητας και ακρίβειας (υψομετρικά δεδομένα LiDAR), δημιουργούνται ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων, άμεσα διαχειρίσιμα. Κατά το στάδιο προεπεξεργασίας των μοντέλων σημαντική είναι η χρήση του αλγορίθμου πλήρωσης των τοπογραφικών βυθισμάτων από τους Planchon και Darboux (2001), που αποτελεί μία καινοτόμα προσέγγιση, και παρά την πολυπλοκότητά του, πλεονεκτεί έναντι των υφιστάμενων μεθόδων στον χρόνο διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων. Επιπροσθέτως, σημαντική είναι και η εφαρμογή του αλγορίθμου πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Multiple Flow Direction), που προσομοιώνει τη διανομή και τη ροή του υδάτινου στοιχείου στην γήινη επιφάνεια, αποδίδοντας ένα ρεαλιστικό πρότυπο συσσώρευσης ροής. Οι χωρικοί αυτοί αλγόριθμοι, αλλά και η εφαρμογή περαιτέρω μεθόδων, υποστηρίζονται από το λογισμικό SAGA-GIS, το οποίο επιλέχθηκε προς χρήση, καθώς είναι ευέλικτο, με σημαντικά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία και ανάλυση υψομετρικών χωρικών δεδομένων. Στην συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα ανάλυσης των αποτελεσμάτων, κατά την σύγκριση των μοντέλων διαφορετικών αναλύσεων με το μοντέλο αναφοράς, χωρικής ανάλυσης 1 m. Η επιλογή της ανάλυσης στο ΨΜΥ είναι ιδιαίτερος σημαντική, διότι αποτελεί το μέτρο της περιεχόμενης πληροφορίας στο μοντέλο και μπορεί να συσχετίσει το περιεχόμενο των δεδομένων με την πραγματικότητα των εν δυνάμει περιοχών μελέτης, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα κατά την αναπαράσταση. Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα της σύγκρισης των γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών χαρακτηριστικών προέκυψαν για την λεκάνη απορροής του ποταμού Madden, η έκταση της οποίας είναι περίπου 5,5 km² και χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο με επικρατούσες κλίσεις έως και 50% και από μετρίως υψηλό δυναμικό απορροής που σχηματίζει ένα σύνθετο αποστραγγιστικό δίκτυο. Ως προς τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ❖ Μειώνοντας την χωρική ανάλυση στο ψηφιακό μοντέλο, δημιουργούνται μικρότερες τιμές κλίσεων σε έντονες πλαγιές και μεγαλύτερες τιμές σε πλαγιές ήπιας κλίσης. Η σύγκριση των μοντέλων κλίσης ανέδειξε μικρής τάξεως μεγέθη στα στατιστικά χαρακτηριστικά, γεγονός που ερμηνεύει ότι παρά του ότι η κλίση υποεκτιμάται κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης, παρατηρείται καλή προσαρμογή του μοντέλου των Zevenbergen και Thorne (1987) μεταξύ των συγκρινόμενων μοντέλων.

- ❖ Ομοίως, για την παράμετρο κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης παρατηρούνται μικρής τάξεως διαφορές, στην σύγκριση των μοντέλων. Ειδικότερα, για τις χωρικές αναλύσεις 5 m, 10 m & 25 m παρουσιάζεται μία συμμετρία του παραβολοειδούς προσαρμογής των Zevenbergen και Thorne (1987) σε σχέση με την χωρική ανάλυση του μοντέλου αναφοράς.
- ❖ Οι συνιστώσες καμπυλότητας κάθετα και παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά. Η μείωση της χωρικής ανάλυσης επιφέρει έντονη υποεκτίμηση των τιμών μειώνοντας το εύρος των διαβαθμίσεων και στις δύο διαστάσεις της καμπυλότητας. Έτσι φαίνεται ότι σταδιακά προχωρώντας προς τις χαμηλότερες αναλύσεις τίθενται περιορισμοί ως προς τον χαρακτηρισμό της περιοχής, υπό τους όρους κυρτότητας και κοιλότητας του εδάφους. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις των στατιστικών σύγκρισης των μοντέλων.
- ❖ Από τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους της κλίσης, της κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης και των συνιστωσών καμπυλότητας συμπεραίνεται ότι το μοντέλο των Zevenbergen και Thorne (1987) δεν δημιουργεί σημαντικές αποκλίσεις κατά την αλλαγή της χωρικής ανάλυσης, όπως προκύπτει από τη στατιστική ανάλυση των διαφορών στα κοινά σημεία των συγκρινόμενων μοντέλων.
- ❖ Αναφορικά με την συσσώρευση ροής συμπεραίνεται ότι η αύξηση της διάστασης του φατνίου έχει ως αποτέλεσμα: ο αλγόριθμος πολλαπλής κατεύθυνσης ροής να υπολογίζει αυξημένους όγκους απορροής, με τα μεγαλύτερα σφάλματα να συγκεντρώνονται σε περιοχές μικρών λεκανών απορροής.
- ❖ Κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης εμφανίζεται σταδιακή μετατόπιση προς τις υψηλότερες τιμές του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας. Οι χωρικές αναλύσεις των 5 m και 10 m κρίνονται πιο ικανοποιητικές σε περιοχές όπου το ανάγλυφο είναι πιο έντονο και περιοριστικές στα ρέματα της περιοχής. Η επιλογή της χωρικής ανάλυσης των 25 m και 50 m, υπερεκτιμά σημαντικά τις τιμές του δείκτη σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου, αποδίδοντας αυξημένη πιθανότητα κορεσμού της υγρασίας του εδάφους και εισάγοντας σημαντικά ερωτήματα σχετικά με τη ρεαλιστική απόδοση της υφιστάμενης κατάστασης.
- ❖ Το χωρικό πρότυπο του συντελεστή αναγλύφου αποδίδει υψηλότερη πιθανότητα διάβρωσης στα μοντέλα των χαμηλότερων χωρικών αναλύσεων, ειδικότερα κοντά στις σχηματιζόμενες μισγάγγειες.
- ❖ Ο δείκτης ροής ενέργειας συνδέεται άμεσα με το μοντέλο συσσώρευσης ροής και ως απόρροια αυτού, τα μοντέλα χαμηλότερων αναλύσεων εκφράζουν μεγαλύτερο βαθμό δαπάνης ενέργειας της ροής, αυξάνοντας τις ζώνες εναπόθεσης υλικού και

εντείνοντας τις διαδικασίες διάβρωσης, που συντελούνται υπό την επενέργεια της κίνησης του νερού.

Ως προς τις παραμέτρους υδρολογικού ενδιαφέροντος επισυνάπτονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ❖ Η έκταση της λεκάνης απορροής παρουσιάζει μικρή μεταβολή κατά τη μείωση της χωρικής ανάλυσης, γεγονός που καθιστά ικανοποιητική την χρησιμοποίηση όλων των συγκρινόμενων μοντέλων, σε μια υδρολογική μελέτη προκαταρτικού σταδίου.
- ❖ Παρά την ομαλοποίηση που υφίσταται το ανάγλυφο, με την αύξηση της διάστασης του φατνίου στο μοντέλο, η κατανομή των υψομέτρων στην λεκάνη απορροή είναι όμοια σε κάθε περίπτωση χωρικής ανάλυσης.
- ❖ Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής μεταβάλλεται κατά το μέγιστο στην χαμηλότερη συγκρινόμενη ανάλυση των 50 m και παρουσιάζεται σε μία απόκλιση της τάξεως των 2 m. Ωστόσο η διαφορά αυτή εμφανίζεται ικανοποιητική, δεδομένων και των διαδικασιών προεπεξεργασίας των μοντέλων.
- ❖ Η μέση κλίση της λεκάνης απορροής, όμοια με το μέσο υψόμετρο, μειώνεται σταδιακά κατά την μείωση της χωρικής ανάλυσης. Παρ' όλα αυτά, η κατανομή των κλίσεων στις μεγαλύτερες τιμές της κλίσης φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις χαμηλότερες παρατηρούμενες τιμές, όπου η κατανομή στα συγκρινόμενα μοντέλα προσεγγίζει εκείνη του μοντέλου αναφοράς.
- ❖ Η σύγκριση του λόγου διακλάδωσης κατά Horton (R_B) συνδέεται με γεωμορφολογικούς παράγοντες της λεκάνης απορροής. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το μοντέλο της αραιότερης ανάλυσης αποδίδει με πιο επίπεδη μορφή το ανάγλυφο της λεκάνης και με πιο κυκλική γεωμετρία το σχήμα της, ενώ επιπλέον συνδέεται και με αυξημένες πλημμυρικές αιχμές.
- ❖ Η σύγκριση των λόγων του μήκους κατά Horton (R_L) επισημαίνει μια σταθερότητα στις εν λόγω τιμές σε όλα τα μοντέλα, αναδεικνύοντας την ομοιότητα στην αναλογία των μηκών σε σχέση με τις τάξεις του δικτύου, για την έκταση της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής.
- ❖ Λόγω γενίκευσης της πληροφορίας που υφίσταται το μοντέλο στην αραιότερη ανάλυση, το ελικοειδές σχήμα των υδατορευμάτων, περιορίζεται σημαντικά κατά την οπτικοποίηση, υποεκτιμώντας το μήκος της κύριας μισγάγγειας. Η διαφορά της τάξης του 15% στο μήκος του κύριου υδατορεύματος, μεταξύ του μοντέλου της χαμηλότερης ανάλυσης με το μοντέλο αναφοράς, είναι σε ικανοποιητικά πλαίσια απόκλισης, για την δεδομένη περιοχή μελέτης.

- ❖ Όσον αφορά την διαμόρφωση του αποστραγγιστικού δικτύου, η μείωση της χωρικής ανάλυσης επιφέρει μείωση του αριθμού των ρεμάτων και κατ' επέκταση συρρίκνωση του δικτύου, με αποτέλεσμα η υδρογραφική πυκνότητα αποστράγγισης να εμφανίζει μικρότερες τιμές.
- ❖ Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής εμφανίζει ανεξαρτησία ως προς την μεταβολή της χωρικής ανάλυσης στο μοντέλο.

Τα αποτελέσματα της υφιστάμενης μελέτης αξιοποιούν δεδομένα μιας δειγματοληψίας σε περιοχή λεκάνης απορροής συγκεκριμένης μορφολογίας και επομένως δεν μπορούν να αναχθούν σε ένα γενικότερο συμπέρασμα. Στον **Πίνακα 27** οι χωρικές αναλύσεις, που συγκρίθηκαν, χαρακτηρίζονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους στην απόδοση των γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών χαρακτηριστικών. Η χρήση της κάθε χωρικής ανάλυσης στο ΨΜΥ χαρακτηρίζεται ως αποτελεσματική, στην περίπτωση καλής προσαρμογής στο μοντέλο αναφοράς, ως αναποτελεσματική, στην περίπτωση όπου εισάγονται σημαντικές αποκλίσεις κατά την σύγκριση και ως περιοριστική, στην περίπτωση όπου η χρήση της χωρικής ανάλυσης τείνει μεν να προσεγγίσει το μοντέλο αναφοράς θέτοντας δε περιορισμούς που σχετίζονται με την στατιστική αξιολόγηση ή την αναπαράσταση (ΑΠ: Αποτελεσματική χρήση, ΠΕ: Περιοριστική χρήση, ΑΝ: Αναποτελεσματική χρήση).

Πίνακας 27. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής (Ερμηνεία: ΑΠ: Αποτελεσματική χρήση, ΠΕ: Περιοριστική χρήση, ΑΝ: Αναποτελεσματική χρήση)

Χαρακτηριστικό	Χωρική ανάλυση μοντέλου (m)			
	5	10	25	50
Κλίση	ΑΠ	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ
Κατεύθυνση μέγιστης κλίσης	ΑΠ	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ
Καμπυλότητες	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Τοπογραφικός δείκτης υγρασίας	ΠΕ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Δείκτης ροής ενέργειας	ΠΕ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Συντελεστής αναγλύφου	ΠΕ	ΠΕ	ΠΕ	ΑΝ
Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Μήκος κύριας μισγάγγειας	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Κατανομή υψομέτρων	ΑΠ	ΑΠ	ΑΠ	ΑΠ
Κατανομή κλίσεων	ΠΕ	ΠΕ	ΑΝ	ΑΝ
Χρόνος συγκέντρωσης	ΑΠ	ΑΠ	ΠΕ	ΑΝ

Επομένως, ως ένα γενικότερο συμπέρασμα εξάγεται ότι η μορφομετρική ανάλυση του αναγλύφου ΨΜΥ σε ζητήματα υδατικών πόρων, θα πρέπει να εφαρμόζεται σε συνάρτηση με το μέγεθος των χαρακτηριστικών της επιφάνειας, τα οποία επρόκειτο να μελετηθούν, καθώς και με τις μεθόδους των επιμέρους διαδικασιών, ενώ επιπροσθέτως είναι αναγκαίο να καθοδηγείται από τους στόχους, τις απαιτήσεις και το κόστος περάτωσης της εκάστοτε μελέτης.

6.2. Προοπτικές-Προτάσεις

Το ζήτημα της ποιότητας και της χωρικής ανάλυσης είναι δύο σημαντικά χαρακτηριστικά του ΨΜΥ, που μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της κάθε εφαρμογής και για αυτό απαιτείται περαιτέρω αναζήτηση προς την κατεύθυνση αυτή. Ακόμη, το ζήτημα της βέλτιστης κλίμακας είναι σημαντικό, καθώς η μελλοντική έρευνα θα πρέπει, βάσει της συσχέτισης των χαρακτηριστικών του εδάφους με την κλίμακα, να καθορίσει την βέλτιστη αναπαράσταση για τις διάφορες εφαρμογές, όπως είναι η

ανάλυση ορισμένων τύπων εδαφών, η μελέτη υδρολογικών συνθηκών, τα προβλήματα υποβάθμισης του εδάφους, κ.ά. Προς την κατεύθυνση της τεχνολογικής προόδου, η ποιότητα των ΨΜΥ και οι νέες μεθοδολογίες raster δεδομένων θα συνεχίσουν να αποτελούν έναν εξελισσόμενο τομέα που θα συμβάλλει θεμελιωδώς στην διεξαγωγή και άλλων επιστημονικών ερευνών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Ελληνική

- Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3^η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Νάκος, Β., Ψηφιακή απεικόνιση χαρτογραφικών φαινομένων βασισμένη στην θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας- Εφαρμογή στο τοπογραφικό ανάγλυφο σε ψηφιακά μοντέλα, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1990.
- Τσακίρης, Γ., και Βαγγέλης, Χ., Υδατικοί Πόροι II, Εφαρμογές Τεχνικής Υδρολογίας, Αθήνα, 2009.
- Τσούλος, Λ., Ψηφιακή Χαρτογραφία, Έκδοση 2^η, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Φουμέλης Μ. και Βασιλάκης Εμμ., Αποκλίσεις μεταξύ μεθόδων Εκτίμησης των κλίσεων και ο ρόλος της ανάλυσης των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου. Συγκριτική μελέτη σε περιβάλλον GIS, Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Θεσ/νίκη, 2004.

B. Ξενόγλωσση

- Behrens, T., Zhu, X., Schmidh, K., Scholten, T., Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping, *Geoderma*, Vol. 155, pages 175-185, 2010.
- Beven, K. J., Quinn, P. F., Lamb, R., The $\ln(a/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrological Processes*, 9: 161–182, 1995.
- Cadell, W., Report on the generation and analysis of DEMs for spatial modelling, 2002.
- Chow Ven Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., *Applied Hydrology*, 1988.
- Costa-Cabral, M. C., Burgess, S. J., Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hill slopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resources Research*, 30: 1681–1692, 1994.
- Evans, I. S., Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?, *Geomorphology*, Vol. 137, pages 94-106, 2012.
- Fairfield, J., Leymarie, P., Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 27: 709–717, 1991.

- Gallant, J. C., Wilson, J. P., Terrain Analysis-Principles and Applications, United States of America, Canada, 2000.
- Helmlinger, K. R., Foufoula-Georgioly, E., A Geomorphologic Study of River Basins and Hydrologic Response, Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, June 1992.
- Kang-tsung Chang, Bor-wen Tsai, The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping, Cartography and Geographic Information Systems, Vol. 18, pages 69-77, 1991.
- Kienzle, S. W., The effect of DEM raster resolution on first order, second order, and compound terrain derivatives, Department of Geography, University of Lethbridge, Transactions in GIS, U.S.A. , Vol. 8, pages 83-111, 2004.
- Miller, C. L., Laflamme R. A., The Digital Terrain Model -Theory & Application, MIT Photogrammetry Laboratory, 1958.
- Moore, I. D., Graycon, R. B., Lanson, A. R., Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, Hydrological Processes, Vol. 5, pages 3-30, 1991.
- O'Callaghan, J. F. Mark, D. M., (1984), The extraction of drainage networks from digital elevation data, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28: 328–344.
- Perez-Kuroki, A., Isozaki, Y., Kikutchi, A., Nakagoshi, N., High Resolution Stream Network in Haji dam Watershed, Journal of International Development and Cooperation, Vol. 13, No.1, pp 89-107,2007.
- Pike, R. G., Evans, I. S., Hengl, T., Geomorphometry: A brief guide, Developments in Soil Science, Vol. 33, 2009
- Planchon, O., Darboux, F., A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, Catena, Vo. 46, pages 159-176, 2001.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O., The prediction of hill slope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, Hydrological Processes, Vol.5, pages 59-79, 1991.
- Roberts, D. M., Reuter, J. E., Draft -Lake Tahoe Total Maximum Daily Load Technical Report California and Nevada, September 2007.
- Rodriguez, J. G., and Gimenez Suarez, M. C., Historical review of topographical factor, LS, of water erosion models, Aqua-LAC , Vol. 2 , No.2, September, 2010.
- Scheidegger, A. E., Horton's Laws of Stream Numbers, Water Resources Research, U.S. Geological Survey, Urbana, Vol.4, No.3, June 1968, pp 655-658.

- Shary, P. A., Sharaya, L. S., Mitusov, A. V., Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma, Vol. 107, pages 1-32, 2002
- Tarboton, D. G., A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, Water Resources Research, 33: 309–319,1997.
- Wolock, D. M., McCade Jr., G. J., Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, Water Resources Research, Vol. 31, No.5, pages 1315-1324, May, 1995.
- Zandbergen, P. A., The effect of cell resolution on depressions in digital elevation models, Department of Geography, University of South Florida, Applied GIS, Vol.2, No.1, 2006.
- Zhang, W., Montgomery, D. R., Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations, 1994.
- Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., Quantitative analysis of land surface topography, Earth processes and landforms, Vol. 12, pages 47-66, 1987.
- Zhilin Li, Zhu, Q., Gold, C., Digital Terrain Modelling - Principles and Methodology, 2005.
- Zhou, Q., Liu, X., Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 16, No.8, pages 819-842, 2002.

Γ. Διαδικτυακοί τόποι

http://www.et-st.com/et_surface/userguide/Raster/ETG_RasterCurvature.htm

http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/surface/mi08_182.htm

<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/giswr2010/giswr2010.htm>

<http://usparks.about.com/od/usnationalparks/u/National-Parks.htm#s1>

<http://www.trekamerica.com/usa-national-parks.html>

<http://waterdata.usgs.gov/nwis/rt>

<http://pubs.er.usgs.gov/#resources>

<http://www.usgs.gov>

<http://www.opentopography.org/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Κώδικας υπολογισμού των στατιστικών διαφορών των υψομέτρων πριν και μετά την πλήρωση των βυθισμάτων, στο πρόγραμμα MATLAB, για την περίπτωση του ψηφιακού μοντέλου ανάλυσης 50m (όμοια εφαρμογή και στις υπόλοιπες περιπτώσεις μοντέλων).

```

clc
clear all
format long g
B=load('DEM 50m.asc');
A=load('DEM 50m no sinks.asc');
[nh_1,nv_1]=size(B);
[nh_2,nv_2]=size(A);
C=A-B
[nh_3,nv_3]=size(C)
n3=0
for i=1:nh_3
    for j=1:nv_3
        if C(i,j)~=0
            n3=n3+1
            D(n3,1)=C(i,j)
        end
    end
end
end
m=mean(D)
s=std(D)

```

Κώδικας εφαρμογής του MATLAB, ο οποίος υπολογίζει τις διαφορές των τιμών των συγκρινόμενων μοντέλων, για μία ορισμένη παράμετρο. Ενδεικτικά, ο κώδικας της συγκεκριμένης επεξεργασίας παρουσιάζεται για την σύγκριση του μοντέλου ανάλυσης 5m με το μοντέλο αναφοράς, και ειδικότερα για την παράμετρο της κλίσης. Ο ίδιος αλγόριθμος εφαρμόστηκε και για τις υπόλοιπες συγκρίσεις των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών, μεταβάλλοντας το βήμα σάρωσης για την εύρεση των κοινών στα ζεύγη των μοντέλων σύγκρισης.

```

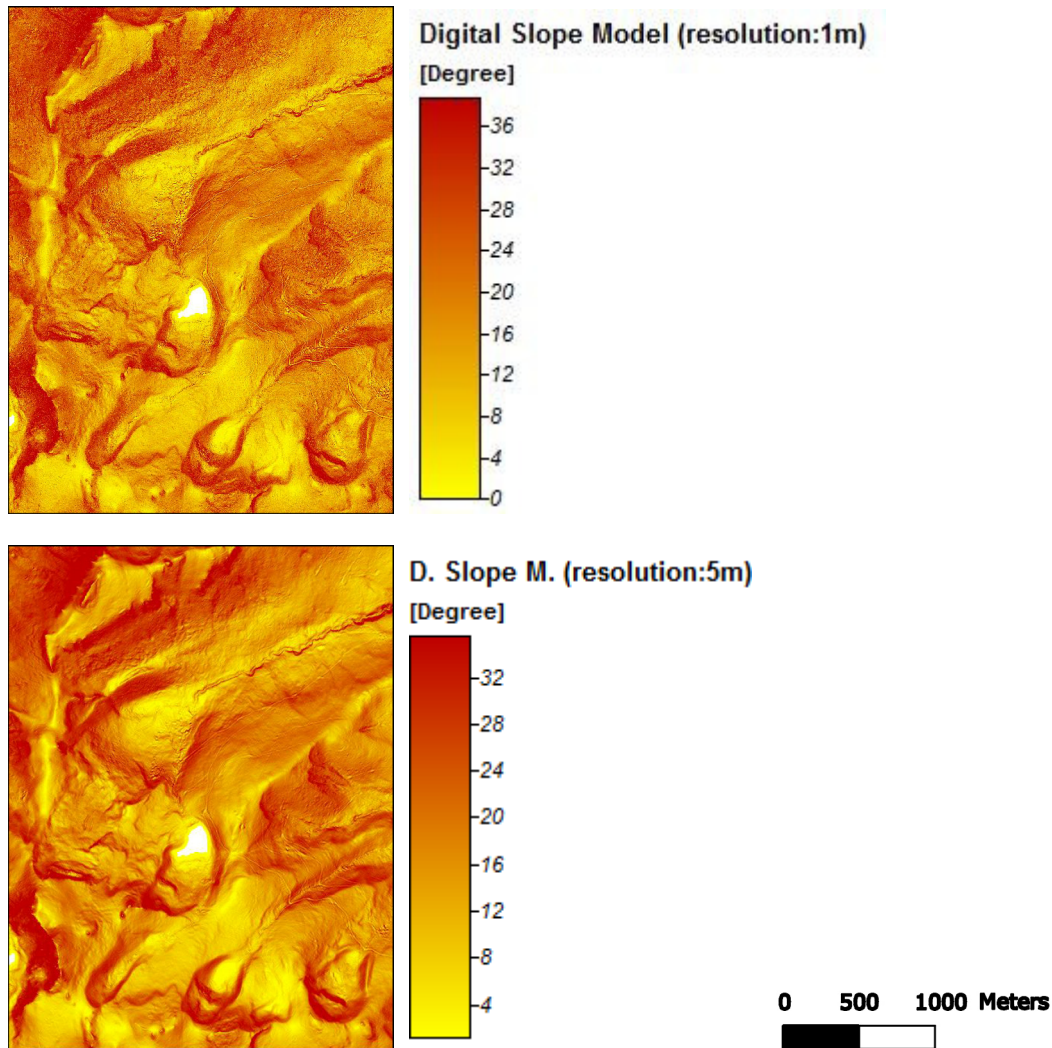
clc
clear all
format long g
D1=load('DEM1slope.asc');
D50=load('DEM50slope.asc');
[nh_1,nv_1]=size(D1);
[nh_2,nv_2]=size(D50);
k=1;
l=1;
for i=1:50:nh_1
    for j=1:50:nv_1
        if i==0
            i=1;
        end
        if j==0
            j=1;
        end
        A(k,1)=D1(i,j);
        l=l+1;
    end
end
l=1;

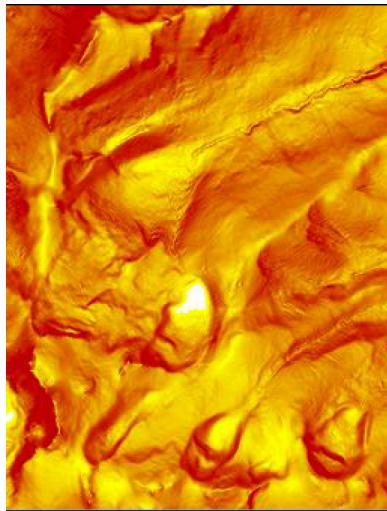
```

```
    k=k+1;  
end  
DSlope=A-D50;
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

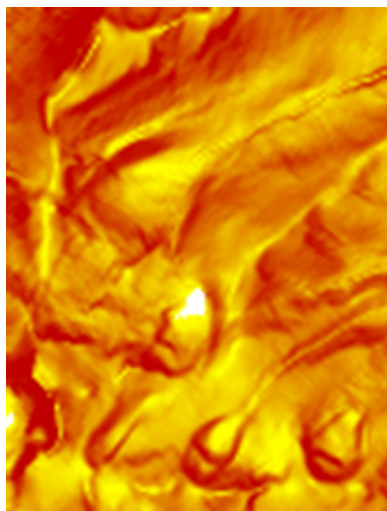
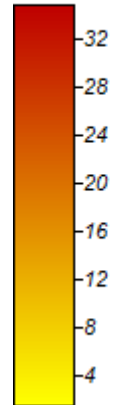
Στο παράρτημα II, προσαρτώνται τα ψηφιακά μοντέλα διαφορετικής χωρικής ανάλυσης, για κάθε γεωμορφομετρικό χαρακτηριστικό. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι λόγω έλλειψης δεδομένων LiDAR σε τμήματα της περιοχής μελέτης, η απουσία της υψομετρικής πληροφορίας είναι εμφανής στα ψηφιακά μοντέλα και αφορά δύο περιοχές λιμνών που χωροθετούνται στο κέντρο και νοτιοδυτικά του μοντέλου, αντίστοιχα.

Ψηφιακά μοντέλα κλίσης



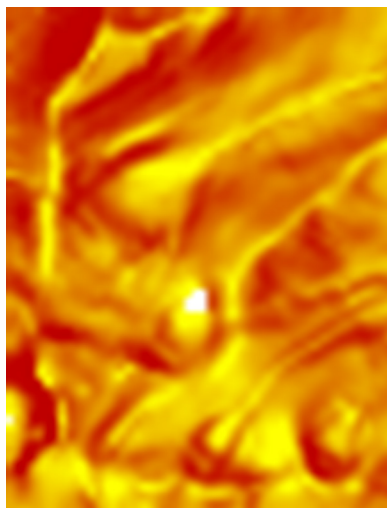
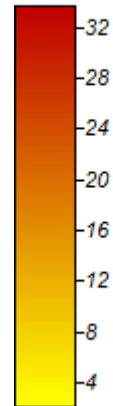
D. Slope M. (resolution:10m)

[Degree]



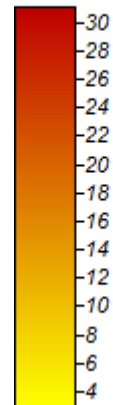
D. Slope M. (resolution:25m)

[Degree]



D. Slope M. (resolution:50m)

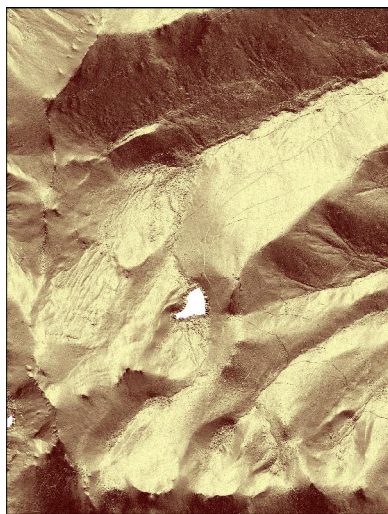
[Degree]



0 500 1000 Meters

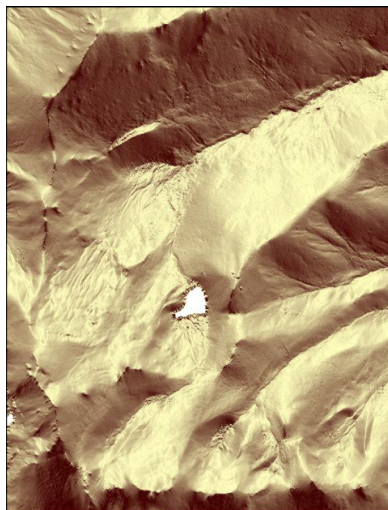
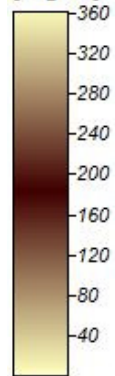


Ψηφιακά μοντέλα διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης



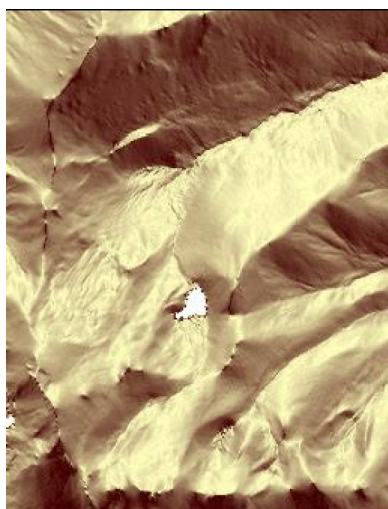
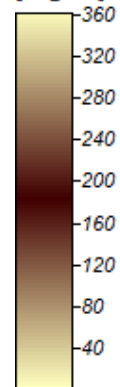
Digital Aspect Model (resolution:1m)

[Degree]



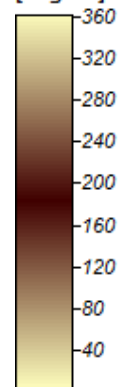
D. Aspect M. (resolution:5m)

[Degree]



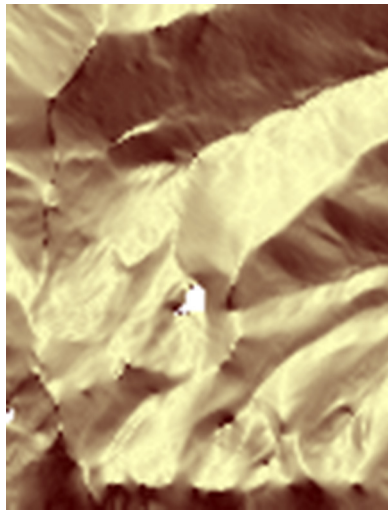
D. Aspect M. (resolution:10m)

[Degree]



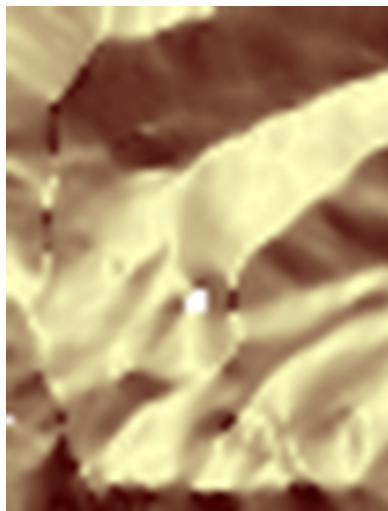
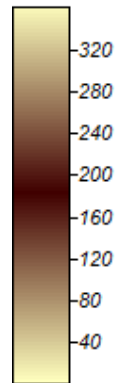
0 500 1000 Meters





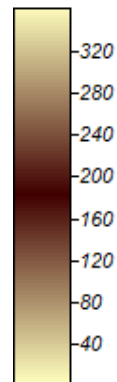
D. Aspect M. (resolution:25m)

[Degree]

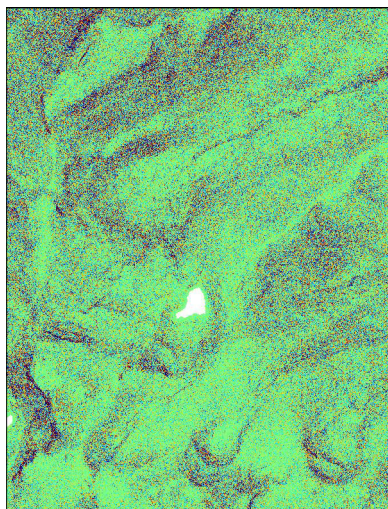


D. Aspect M. (resolution:50m)

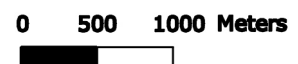
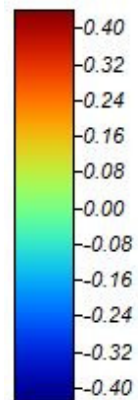
[Degree]

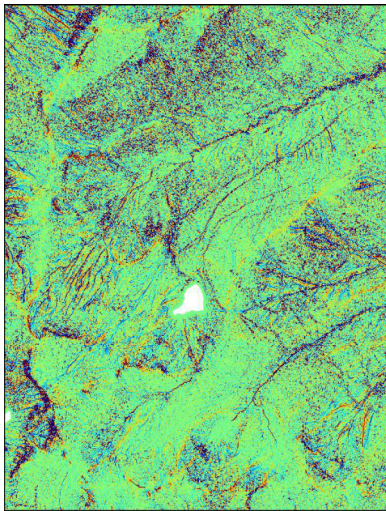


Ψηφιακά μοντέλα καμπυλότητας κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης

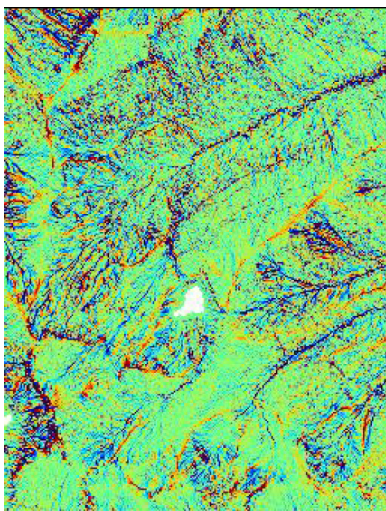
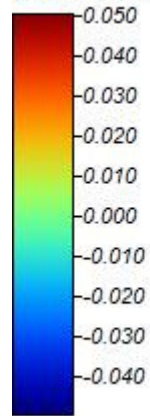


D. Plan Curvature M. (resolution:1m)

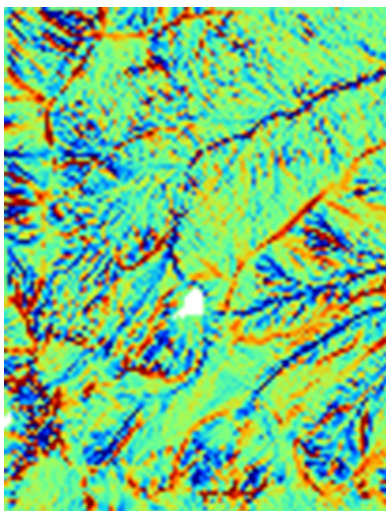
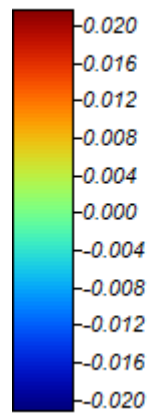




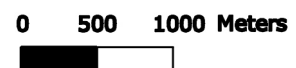
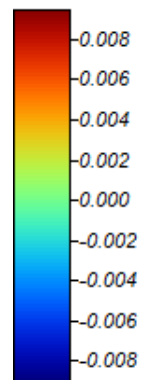
D. Plan Curvature M. (resolution:5m)

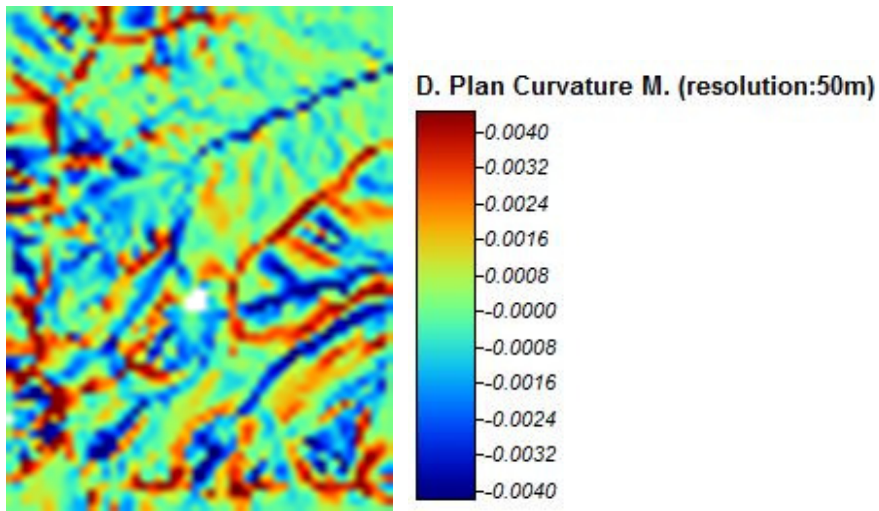


D. Plan Curvature M. (resolution:10m)

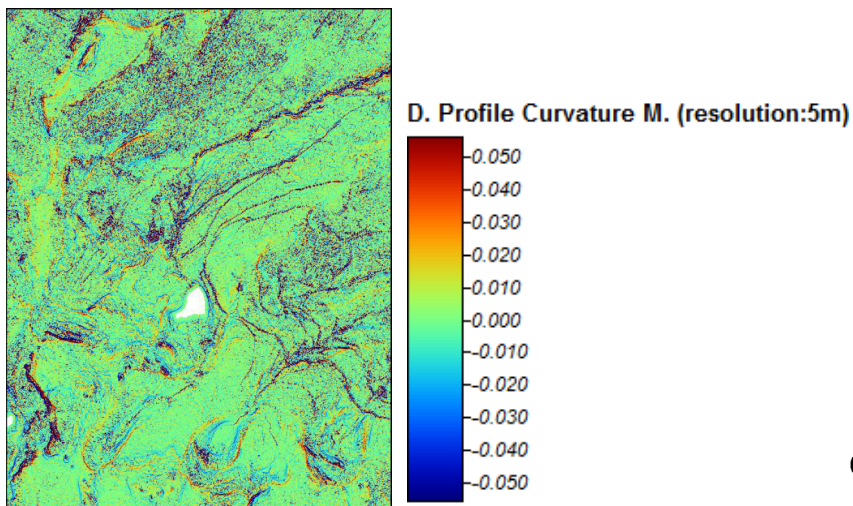
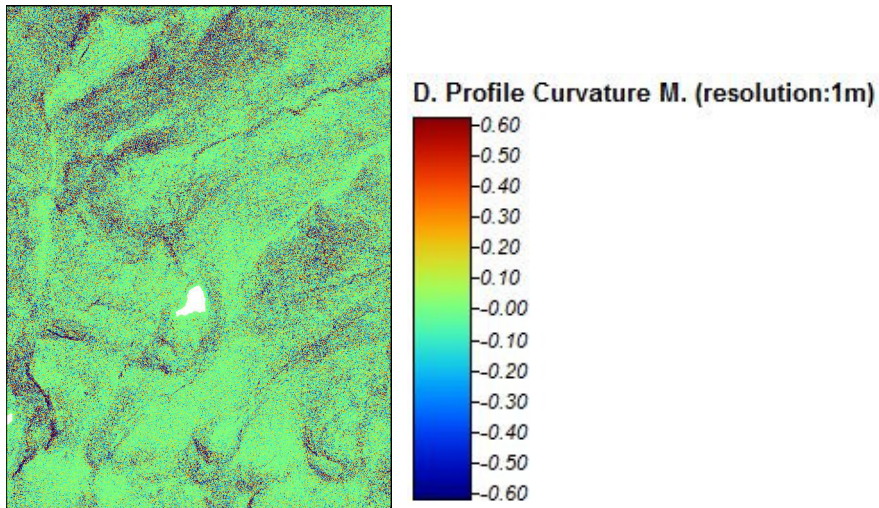


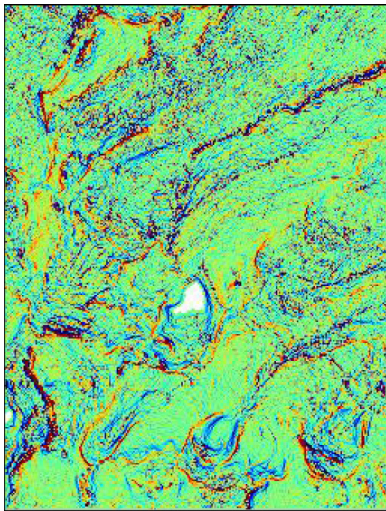
D. Plan Curvature M. (resolution:25m)



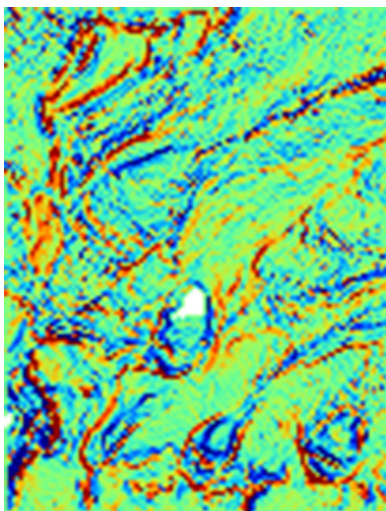
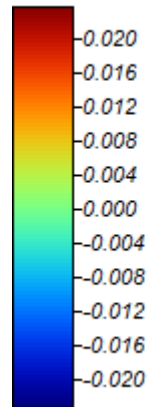


Ψηφιακά μοντέλα καμπυλότητας παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης

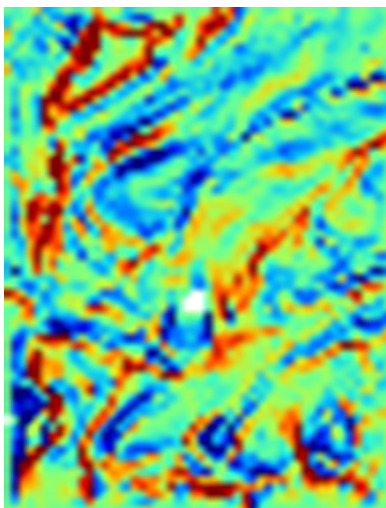
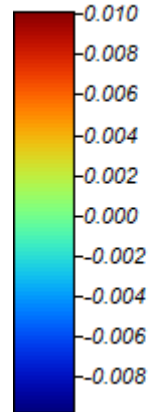




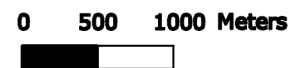
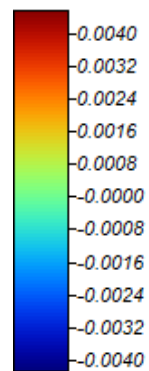
D. Profile Curvature M. (resolution:10m)



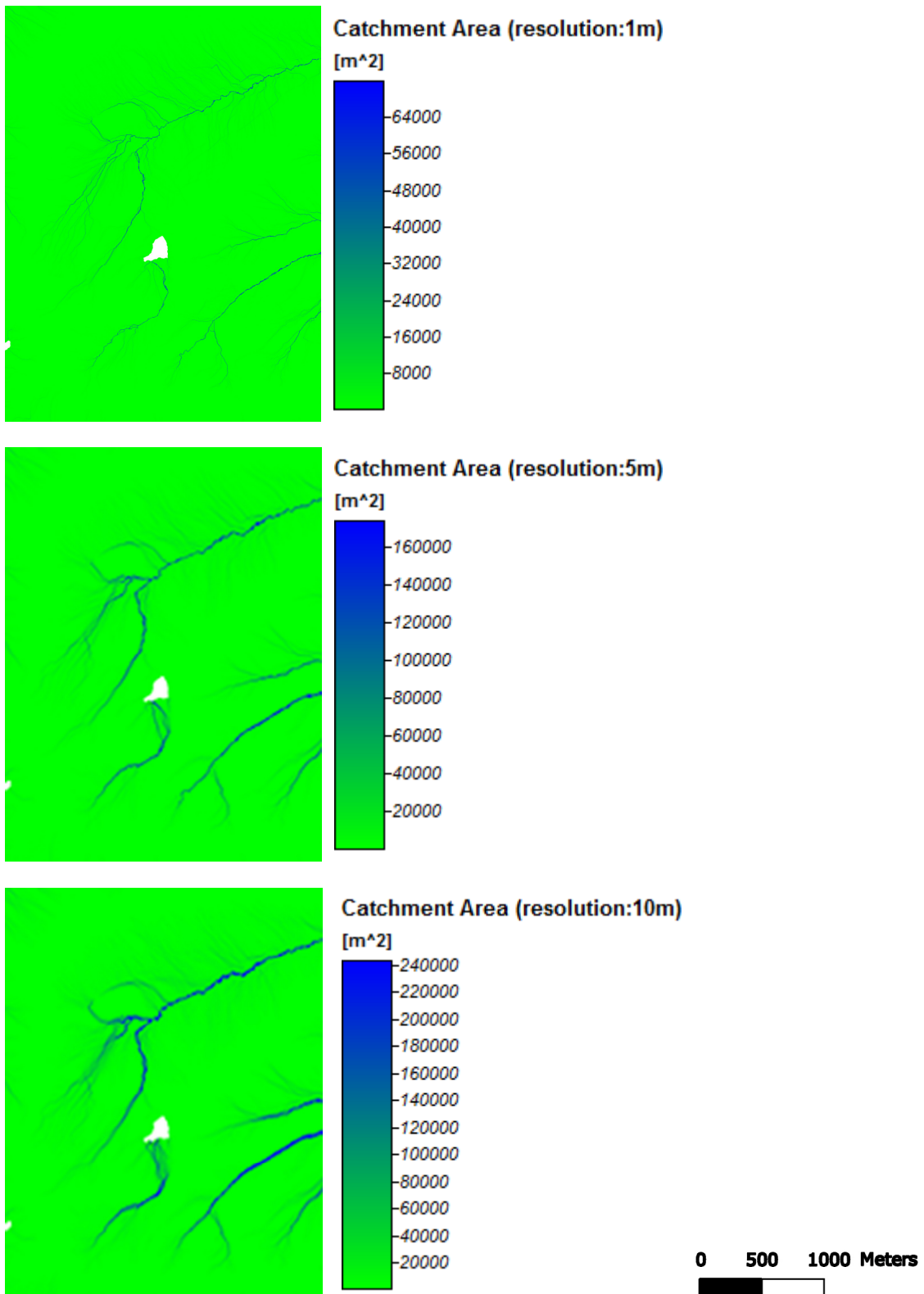
D. Profile Curvature M. (resolution:25m)

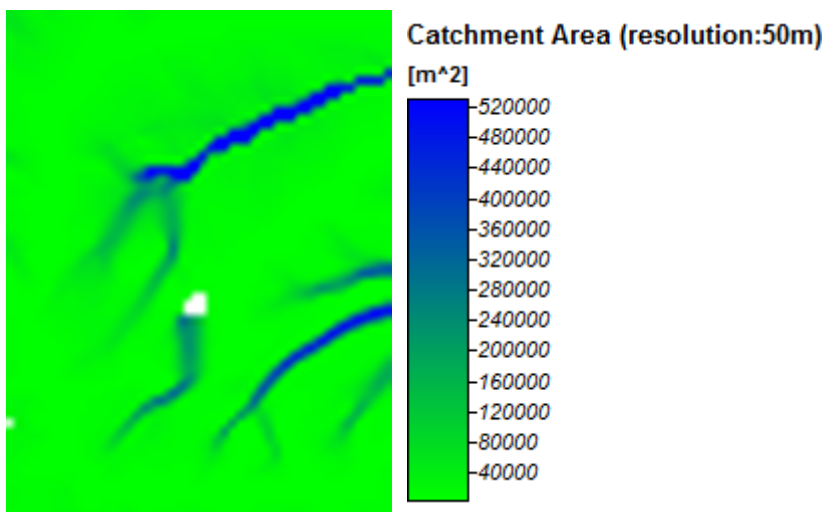
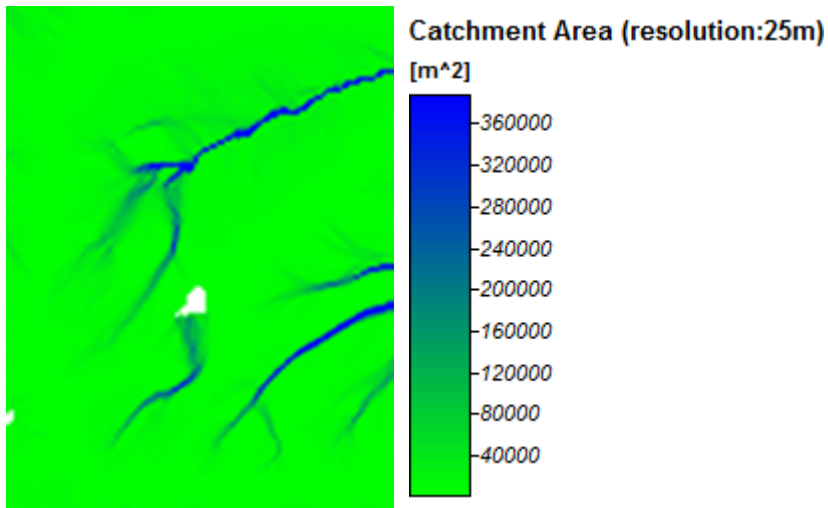


D. Profile Curvature M. (resolution:50m)

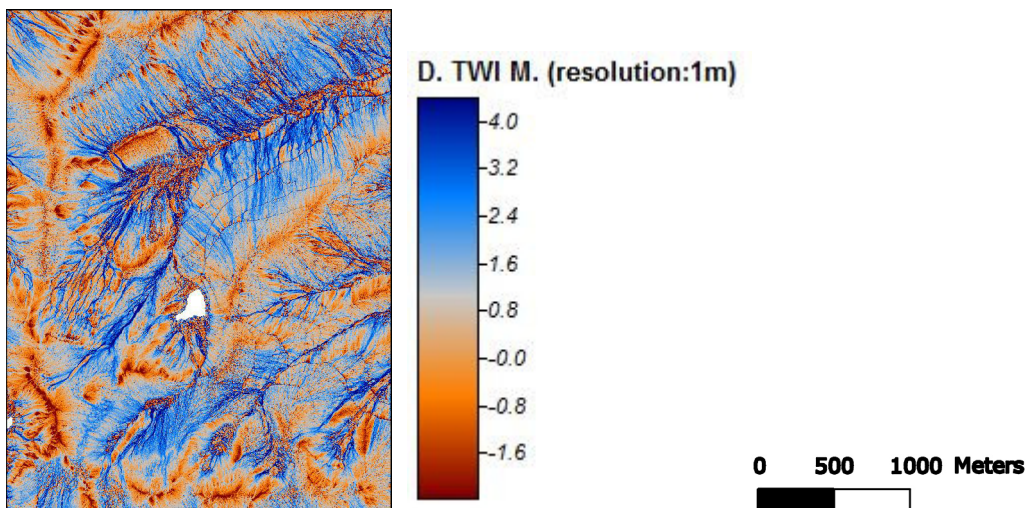


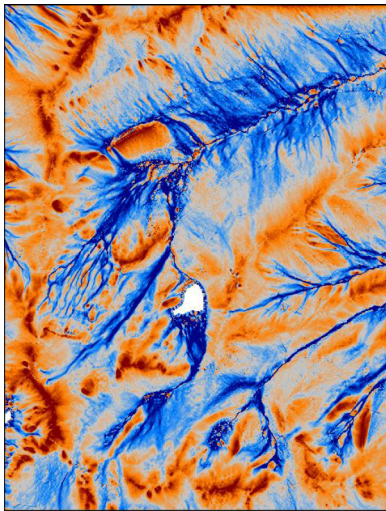
Ψηφιακά μοντέλα αναπαράστασης της συσσώρευσης ροής



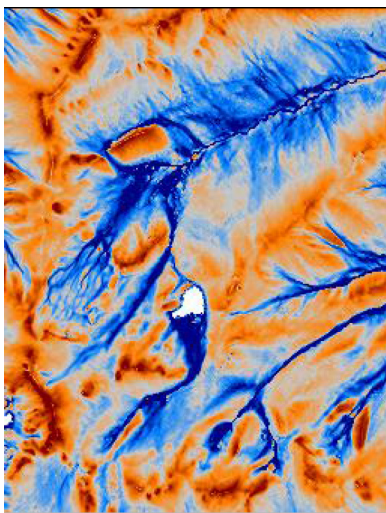
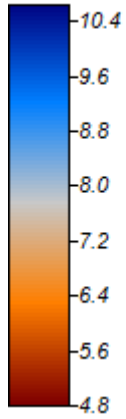


Ψηφιακά μοντέλα αναπαράστασης του τοπογραφικού δείκτη υγρασίας

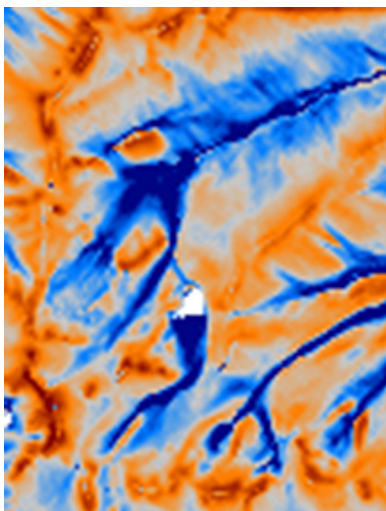
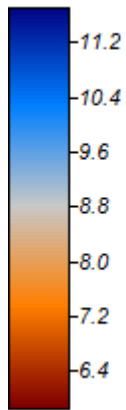




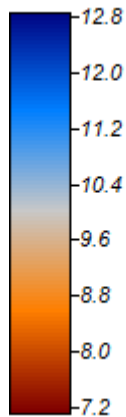
D. TWI M. (resolution:5m)



D. TWI M. (resolution:10m)

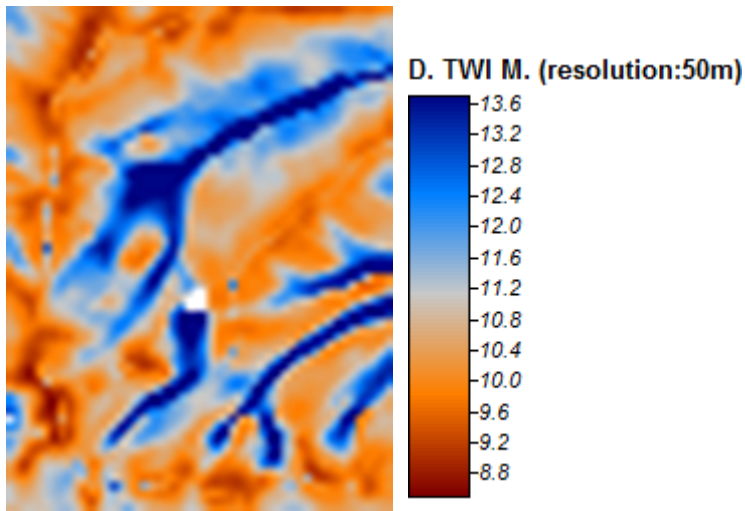


D. TWI M. (resolution:25m)

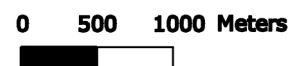
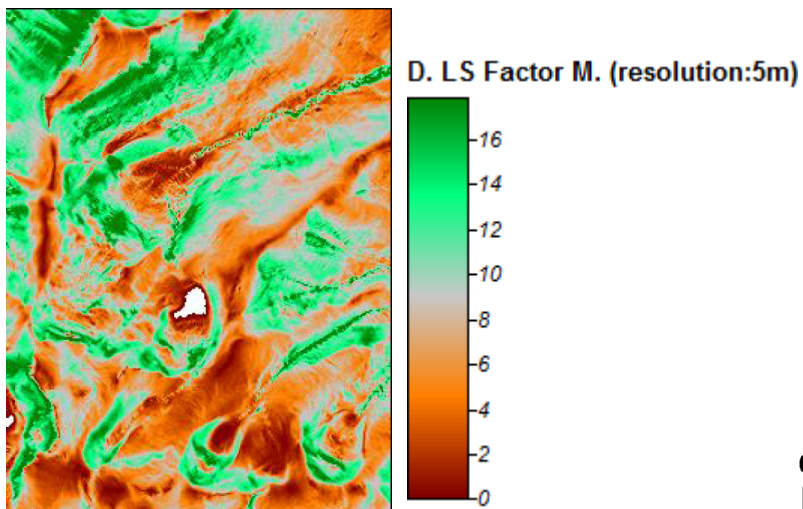
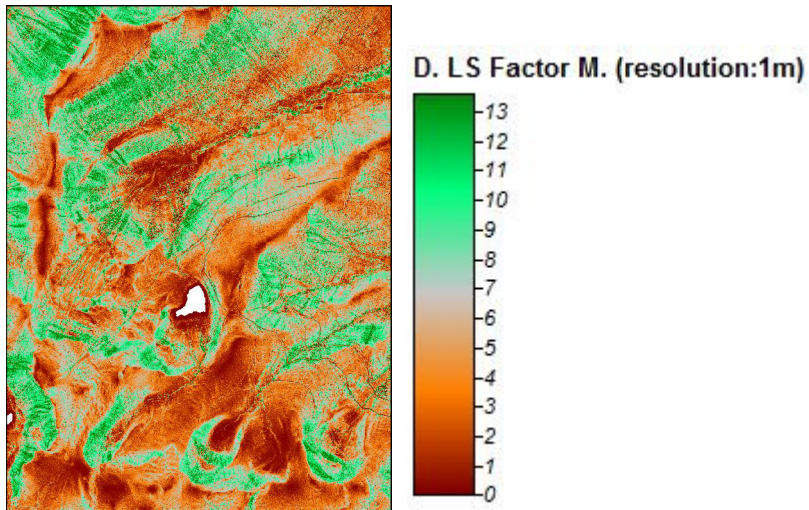


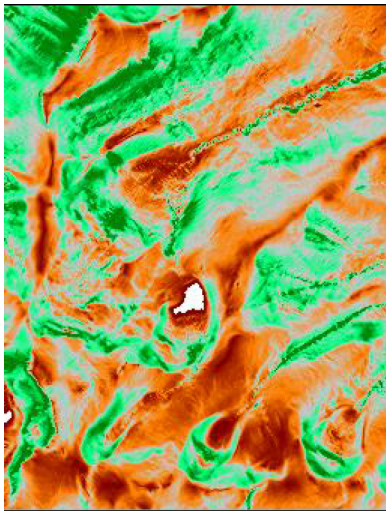
0 500 1000 Meters



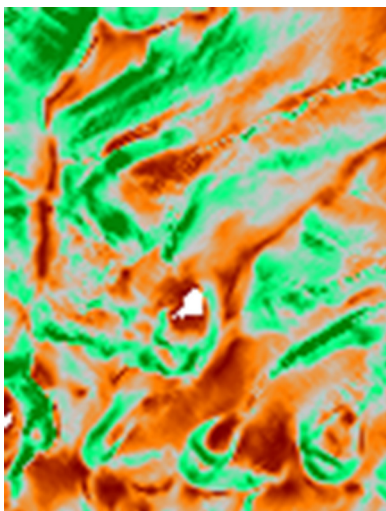
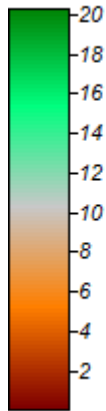


Ψηφιακά μοντέλα αναπαράστασης του συντελεστή αναγλύφου

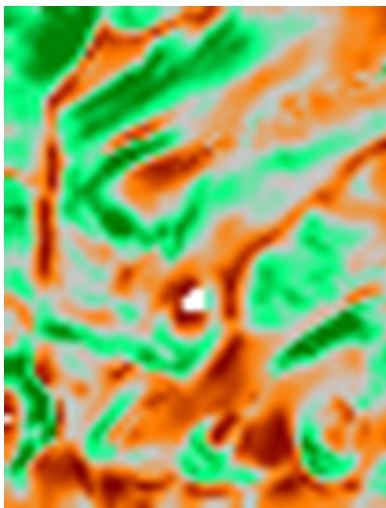
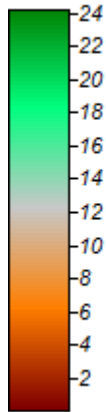




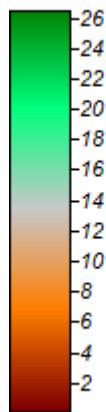
D. LS Factor M. (resolution:10m)



D. LS Factor M. (resolution:25m)



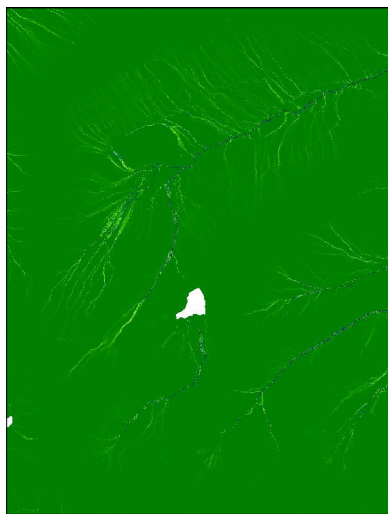
D. LS Factor M. (resolution:50m)



0 500 1000 Meters

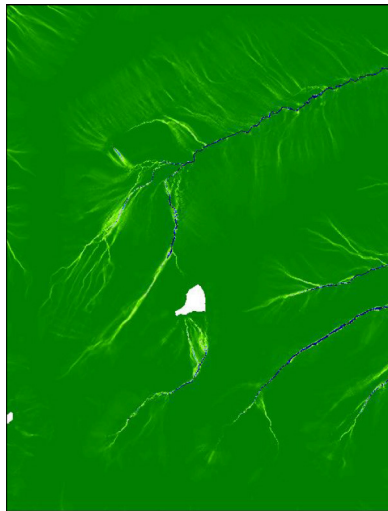
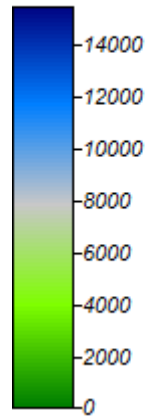


Ψηφιακά μοντέλα αναπαράστασης του δείκτη ροής ενέργειας



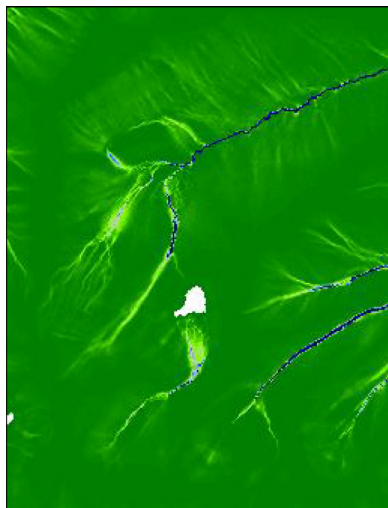
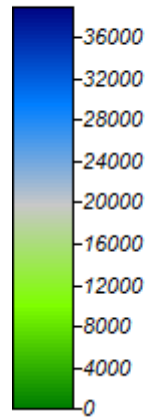
D. S.P.I. M. (resolution:1m)

[(m²)/m]



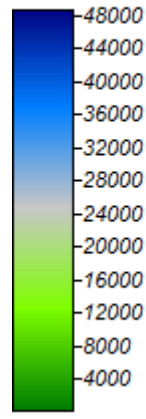
D. S.P.I. M. (resolution:5m)

[(m²)/m]



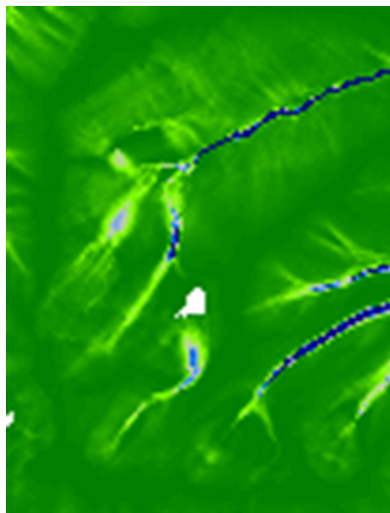
D. S.P.I. M. (resolution:10m)

[(m²)/m]



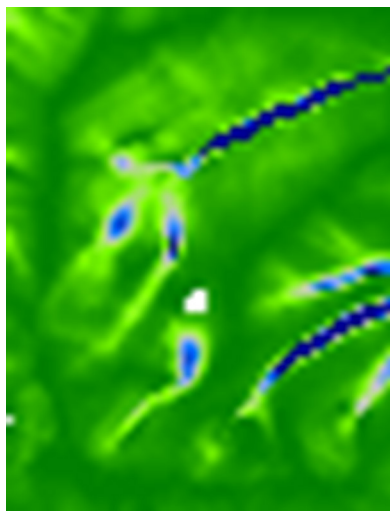
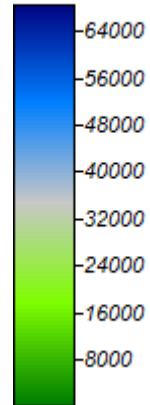
0 500 1000 Meters





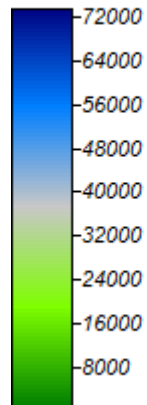
D. SPI M. (resolution:25m)

[(m²)/m]



D. SPI M. (resolution:50m)

[(m²)/m]



0 500 1000 Meters

